

**БУЛГАКОВ Ю. Ф., БОРЩЕВСКИЙ С. В., МАРИЙЧУК И. Ф.,  
КОЛОСНИЧЕНКО М. В., КУРБАЦКИЙ Е. В., ВЫГОВСКАЯ Д. Д.**

## **ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА**



$$\tau_{\Delta} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial \tau} = (T_{\Delta} - T_{\Pi}) - \alpha \cdot s \cdot (T_{\Pi} - T_{\Theta}) + \Delta T_{\Phi}$$

**Монография**



**БУЛГАКОВ Ю. Ф., БОРЩЕВСКИЙ С. В., МАРИЙЧУК И. Ф.,  
КОЛОСНИЧЕНКО М. В., КУРБАЦКИЙ Е. В., ВЫГОВСКАЯ Д. Д.**

## **ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА**

*Под общей редакцией доктора технических наук,  
профессора Булгакова и кандидата  
технических наук, доцента Марийчука И. Ф.*

Монография

**Донецк  
2015**

УДК [614.895.5:621.5]:622 – 051

**ББК**

**М**

*Рекомендовано к печати решением Ученого совета Института горного дела и геологии ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (протокол №2 от 27 марта 2015г.)*

**Рецензенты:**

**Греков С.П.** – доктор технических наук, с.н.с. (НИИГД «Респиратор»),

**Кудинов Ю.В.** – доктор технических наук, профессор (МакНИИ).

**М... Индивидуальная противогазотепловая защита:** монографии / [Ю.Ф. Булгаков, С.В. Борщевский, И.Ф.Марийчук, М.В. Колосниченко, Е.В. Курбацкий, Д.Д. Выговская]. – Донецк: (Изд-во...), 2015. – ...с.

**ISBN....**

Приведены результаты научных исследований по разработке, созданию и внедрению наиболее рациональных методов и средств – индивидуальной противогазотепловой защиты (СИЗ) членов аварийно-спасательных подразделений: горноспасателей, ВГК шахты, пожарных, а также горнорабочих.

Для оценки шахтного микроклимата разработан комплексный показатель, который учитывает различное сочетание параметров окружающего воздуха: температуры, влажности, скорости движения, теплового излучения, физической нагрузки и дыхания в изолирующем респираторе, позволяющий определить условия, при которых необходимо использовать СИЗ.

Показано, что наиболее целесообразным в условиях нагревающего микроклимата является использование комплекса СИЗ с искусственным охлаждением, в состав которого входят: одежда (жилеты, куртки, газо- и теплозащитные костюмы), средства для ее применения (водоледающие охлаждающие элементы – ОЭ, установки с использованием жидкого азота и сжатого воздуха для замораживания ОЭ на поверхности аварийной шахты и в горных выработках, переносные и передвижные теплоизолирующие контейнеры – доставки ОЭ к месту ведения аварийно-спасательных работ), средства экстренного охлаждения пострадавших при перегревании и механических травмах – пакеты с водно-солевым раствором.

Разработана комплексная компьютерная программа для обучения, тренировки и проверки знаний правил безопасного ведения аварийно-спасательных работ горноспасателями (членами ВГК шахты) в условиях повышенных температур.

На базе разработанных математических моделей механических, тепловых, гидравлических, химических процессов, а также физиологии человека, экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных и реальных условиях, обоснованы конструктивные решения, технические характеристики и внедрены вышеуказанные средства, обеспечивающие безопасное и эффективное ведение аварийно-спасательных работ и работу горнорабочих в условиях нагревающего микроклимата.

Монография может быть использована аспирантами и научными сотрудниками при выполнении научных исследований в областях: теплофизики, механики твердого деформированного тела, физиологии, математического и физического моделирования.

УДК [614.895.5:621.5]:622 – 051  
**ББК...**

**ISBN....**

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема создания безвредных и безопасных условий труда существовала в Украине давно, о чем свидетельствует статистика несчастных случаев: еще (15...20) лет тому назад на производстве погибало около 4 тыс. человек, что в 1,6 раз больше, чем теперь. На сегодня у нас травматизм и профессиональное заболевание в (5...8) раз более высокие, чем в других промышленно развитых странах Европы, то есть состояние охраны труда остается неудовлетворительным. Проблема промышленного травматизма является очень острой - ежегодно на производстве травмируется около 5 тыс. человек, из которых 1,5 тыс. погибают, а больше 3,5 тыс. получают профессиональные заболевания.

Во многих отраслях хозяйства Украины: на производстве или при ведении аварийно-спасательных работ подразделениями ГВГСС и МЧС возникают экстремальные микроклиматические условия (повышенная температура, повышенная или сниженная влажность, скорость движения воздуха, загазованность, задымленность).

От дыма и газов при пожарах в мире ежегодно погибает около 86 человек на 1 млн. населения, причем эта величина имеет тенденцию к дальнейшему росту. Уже сегодня число жертв в США, Швеции, Франции и ряда других стран достигает (20...27) человек на 1 млн. населения. В Украине этот показатель превысил 50 человек на 1 млн. населения.

Эта статистика о пожарах и последствиях от них в значительной степени отражают состояние экономики государства, социальных и демографических процессов, которые происходят в обществе.

Анализ тенденций развития мировой энергетики показывает, что в прогнозируемой перспективе (до 2030 г.) удельный вес угля в топливно-энергетическом комплексе будет непрерывно расти. Для Украины в условиях сокращения импорта нефти и газа и повышении их стоимости увеличение угледобычи необходимо рассматривать как социально-экономическую проблему. Учитывая имеющийся минерально-ресурсный потенциал, угольная промышленность может удовлетворить потребности страны в топливе и обеспечить в ближайшем будущем производственные мощности на уровне (120...125) млн. т. в год.

Уголь – один из главных энергоносителей Украины, важнейшее сырье для металлургии и химической промышленности, вид топлива для населения и коммунально-бытовых потребителей, а соответственно – гарант энергетической, политической и экономической независимости страны.

Технология получения угля, что сложилась в настоящее время и уровень механизации основных и вспомогательных производственных процессов, увеличения глубины, протяжности горных выработок и ухудшения горно-геологических условий повышает потенциальную опасность возникновения неблагоприятных (экстремальных) микроклиматических условий для горнорабочих, а также аварий в шахтах.

Неблагоприятные микроклиматические условия возникают и в металлургической, химической, стеклянной, атомной промышленности, где температура воздуха на рабочих местах превышает санитарно-допустимые значения,

особенно при ремонте оборудования и плавильных печей, что также приводит к несчастным случаям, в том числе с летальным исходом.

Наиболее эффективным мероприятием, направленным на сохранение здоровья и жизнь работников в этих условиях, является применение методов и средств индивидуальной противогазотепловой защиты, чему посвящена эта монография, которая подготовлена на основании результатов пяти кандидатских диссертаций, выполненных в бывшем Научно-исследовательском институте горноспасательного дела и пожарной безопасности (НИИГД) «Респиратор».

Большой вклад в разработку, создание и внедрение средств индивидуальной противогазотепловой защиты горноспасателей, горнорабочих и пожарных внесли ученые и конструкторы: Землянский И.Я., Рыбалко А.П., Карпекин В.В., Вольский, В.А., Волохов И. И., Полшков Н.Я., Диденко Н.С., Колосниченко М.В., Мычко А.А., Очкуренко В.И., которые выполнили работы на ранней стадии решения этой проблемы, а также Положий В.О., Клименко Ю.В., Онасенко А.А., Воронов П.С. и др., за что авторы выражают им большую благодарность.

## **1. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИ РАБОТЕ ГОРНОРАБОЧИХ И ВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ**

Экстремальные микроклиматические условия (нагревающий микроклимат) – сочетание параметров воздуха: температуры, влажности, скорости движения и теплового излучения, физических факторов, при которых меняется теплообмен человека, и проявляется в накопление тепла в организме ( $>2$  Вт) и (ли) в повышенные доли затрат тепла за счет выпаривания влажности ( $>30$  %), приводящие к нарушению состояния здоровья, снижению работоспособности и производительности труда.

Согласно «Правилам безопасности в угольных шахтах» (ПБ) в горных выработках допустимая температура воздуха не должна превышать  $26^{\circ}\text{C}$ . Однако, несмотря на принимаемые меры по нормализации температуры, в настоящее время около 30 % шахт Украины работают в экстремальных микроклиматических условиях (температура воздуха превышает  $26^{\circ}\text{C}$  и достигает  $40^{\circ}\text{C}$  при влажности до 100 %), что нередко приводит к перегреванию организма горнорабочих, потере их здоровья, иногда и к смертельным случаям, большим материальным затратам, увеличению затрат на выплату по профессиональному заболеванию, а избыточное потребление жидкости для снижения температуры тела – к ухудшению работы сердечно-сосудистой системы и почек, а, следовательно, к их госпитализации (шахты им. А.Ф.Засядько, М.И. Калинина, А.А. Скочинского и др.). При возникновении пожаров эти условия еще более осложняются ввиду непригодной для дыхания среды и воздействия теплового излучения.

В среднем ежегодно количество аварий, ликвидированных членами ВГК шахты в экстремальных микроклиматических условиях, составляет около 4 % от общего их количества. Такая низкая результативность ведения аварийно-спасательных работ членами ВГК шахты объясняется, в первую очередь, отсутствием на их оснащении индивидуальных средств противогазотепловой защиты, в том числе средств оказания помощи пострадавшим от перегрева организма. Кроме того, в выработки некоторых шахт Донбасса с температурой воздуха до  $40^{\circ}\text{C}$  проникали химические вещества, что привело к массовым отравлениям горноспасателей и горнорабочих, в том числе к перегреванию их организма и летальному исходу.

Неблагоприятные микроклиматические условия возникают и в металлургической, химической, стеклянной, атомной отраслях промышленности, где температура воздуха на рабочих местах превышает санитарно-допустимые значения, особенно при ремонте оборудования и плавильных печей, что также приводит к несчастным случаям, в том числе с летальным результатом (заводы им. Ильича, Азовсталь; теплоэлектроцентрали Кураховская, Зуевская, Старобешевская; заводы ферросплавов: Стахановский, Запорожский, Мелитопольский и др.)

Сложившаяся к настоящему времени технология добычи угля и уровень механизации основных и вспомогательных производственных процессов, уве-

личение глубины (до 1500 м), протяженности (1000 м и более) горных выработок и ухудшение горно-геологических условий повышает потенциальную опасность возникновения экстремальных микроклиматических условий для горнорабочих, а также аварий в шахтах. Влияние нагревающего микроклимата на человека, особенно в сочетании с физической нагрузкой, приводит к нарушению теплового равновесия организма. Это является следствием теплопритока из окружающей среды выработки и эндогенной теплоты в результате процессов окисления в организме. Даже в состоянии полного покоя обменные процессы в организме протекают с выделением (70...100) Вт энергии. При выполнении физической работы теплопродукция организма усиливается и у хорошо тренированного человека может превысить уровень основного обмена в (10...20) раз. Например, передвижение горнорабочего по горизонтальным выработкам вызывает расход энергии до 290 Вт; по уклону под углом  $(18...27)^\circ$  – 390 Вт; спуск по лаве пологого залегания – 470 Вт; передвижение вверх по наклонной лаве на четвереньках – до 1250 Вт. При мышечной деятельности только часть энергии человека (15...25) % превращается в механическую работу, а остальная выделяется в виде тепла. Если бы продуцируемое тепло не выделялось из организма, то за один час интенсивной физической работы внутренняя температура тела могла бы повыситься с 37 до 47 °С.

При благоприятных микроклиматических условиях организм человека отдает тепло в окружающую среду, в которой при работе средней тяжести он сохраняет теплое равновесие. При этом количество тепла, поступающего извне и выделяющегося в организме, равно количеству тепла, отводимого организмом во внешнюю среду. Тепловое равновесие поддерживается благодаря функционированию системы терморегуляции организма. Если теплопередача в окружающую среду естественным путем становится затруднительной, то система терморегуляции организма начинает выделять пот на поверхности кожи, испарение которого способствует интенсивному теплоотводу, то есть, переносу тепла тела наружу, что сопровождается усилением сердечной деятельности, увеличением частоты сердечных сокращений (ЧСС). При усиленном тепловом воздействии окружающей среды система терморегуляции организма не может обеспечить для стабилизации теплового равновесия теплоотвод. В этом случае организм человека начинает нагреваться, вначале до допустимого теплового состояния (ДТС), а затем до предельного теплового состояния (ПТС), после чего наступает прямая угроза теплового удара.

В связи с этим, согласно ПБ шахтная атмосфера по своему составу, температуре и влажности должна обеспечивать нормальную жизнедеятельность человека в течение всего времени нахождения его под землей, а ее допустимая температура не должна превышать 26 °С.

Если параметры микроклимата отличаются от предельно допустимых величин, то согласно требованиям ПБ в выработках должна применяться система мероприятий, направленных на предупреждение перегревания организма работающих: сокращение времени работы и увеличение времени отдыха горнорабочих, увеличение скорости и сокращение путей движения, а также кондиционирование воздуха; увеличение площади поперечного сечения выработок; приме-



нение спецодежды с искусственным охлаждением. Первое мероприятие является не выгодным для предприятия, а снижение температуры до допустимого значения для глубоких шахт связаны с большими капитальными затратами, вызванными необходимостью проведения дополнительных стволов, различных вентиляционных выработок, приобретения дорогостоящих оборудования, материалов и комплектующих изделий. При этом, как показывают результаты расчетов, увеличение расхода воздуха вдвое при его скорости от 1,0 до 6,0 м/с, глубине выработки от 840 до 1130 м, длине группового откаточного штрека 1000 м приводит к снижению температуры не более чем на 4 °С, что зачастую является недостаточным.

В связи с этим, для обеспечения безопасной работы горнорабочих в этих условиях наиболее целесообразным является использование средств индивидуальной противотепловой защиты.

При возникновении пожаров в горных выработках шахт ситуация еще более усугубляется за счет непригодной для дыхания атмосферы и воздействия теплового излучения от очага пожара при его тушении.

В соответствии с Постановлением Кабинета Министров Украины на действующих, строящихся, реконструируемых и погашаемых шахтах организована и функционирует вспомогательная горноспасательная служба (ВГС). Она создана для эффективного ведения работ по спасению людей и ликвидации аварий в начальный период их возникновения, оказания содействия горноспасательной службе, служит базой для ведения производственно-профилактической работы и совершенствования противоаварийной защиты шахты.

Для выполнения задач, возложенных на ВГС, на каждой шахте организована шахтная горноспасательная станция (ШГС), руководство работой которой осуществляет главный инженер шахты, являющийся ее начальником.

Главными задачами ШГС являются: повышение противоаварийной подготовленности шахты; спасение людей, застигнутых аварией в шахте; ликвидация пожаров и других подземных аварий в начальной стадии их возникновения; участие совместно с профессиональными горноспасательными подразделениями в работах по ликвидации подземных аварий и их последствий, а также технических работах, требующих применения респираторов.

Во исполнение перечисленных задач ШГС осуществляет следующие функции: организацию подземных горноспасательных пунктов и вспомогательных горноспасательных команд (ВГК) с комплектом оснащения, постоянно готовым к применению в аварийных условиях; подбор и подготовку членов ВГК к выполнению возложенных на них задач; разработку плана взаимодействия участковых ВГК при возникновении аварий; подготовку и передачу в ВГСО данных о состоянии противоаварийной готовности шахты к спасению людей и ликвидации аварий; дежурство членов ВГК при ведении огневых работ в подземных выработках и надшахтных зданиях; контроль соответствия плана ликвидации аварий (ПЛА) действительному положению в шахте.

Главный инженер шахты (ответственный руководитель работ по ликвидации аварий) обеспечивает постоянное взаимодействие между ШГС и участками шахты до и в период ликвидации аварий и несет ответственность за орга-

низацию и эффективное функционирование ШГС, в том числе за обеспечение членов ВГК специальным оснащением и оборудованием для выполнения горноспасательных работ, проведения тренировок, несения дежурства.

Техническое оснащение, материалы и оборудование, предусмотренные «Табелем минимального технического оснащения ШГС», в том числе спецодежда для горнорабочего, размещаются в поверхностных помещениях шахтной горноспасательной станции, на подземных пунктах ВГК, в учебно-тренировочных комплексах.

Если члены ВГК шахты не потушат пожар в начальной стадии его развития, то прибывшие на аварийный участок первые подразделения ГВГСС (среднее время их прибытия равно около двух часов) зачастую не могут его ликвидировать первичными средствами пожаротушения со стороны свежей струи, т.к. скорость распространения пожара превышает скорость тушения существующими средствами. Это приводит к потере здоровья и жизни горнорабочих, большим людским и материальным затратам, дестабилизации работы шахты, так как основным способом ликвидации аварий в данном случае является изоляция аварийного участка. В качестве примера следует привести две крупные, которые произошли на шахтах Горской и им. Димитрова, при ликвидации последствий которых выполнялся большой объем аварийно-спасательных работ в экстремальных микроклиматических условиях с использованием в качестве средств индивидуальной защиты только регенеративные респираторы. Подобные случаи гибели и травмирования горноспасателей только в меньших масштабах произошли на шахтах Краснолиманская и Южнодонбасская-1.

В Центральном районе Донбасса произошли аварии, связанные с химическим загрязнением шахт [1]. Вредные для здоровья людей химические вещества: хлорбензол, ацетон, бензол, серная кислота и др. проникали в горные выработки шахт «Александр-Запад» (г. Горловка) и «Углегорская» (г. Енакиеве) с поверхностных объектов Горловского химического завода (ГЗК) объединения «Стирол», Енакиевского коксохимического завода, что привело к гибели трех горнорабочих, к массовому отравлению рабочих шахт и горноспасателей, в том числе к перегреванию организма (температура воздуха в горных выработках достигала 40 °С), к реальной угрозе отравления поверхностных водоемов. В результате закрыта шахта «Александр-Запад», более месяца не работала шахта «Углегорская», полностью или частично блокирован ряд пластов, длительное время не велась добыча угля на шахтах «Кондратьевская» и им. М.И.Калинина объединения «Артемуголь». Это вызвало беспокойство, связанное с возможностью разрастания масштабов этой экологической катастрофы и закрытия шахт, ростом социальной напряженности в регионе. При этом были вскрыты ряд организационных и научно-технических проблем, требующих незамедлительного решения, в частности, ни в одном из документов, регламентирующих вопросы охраны труда и отрасли не предусмотрены подобные ситуации; персонал шахт и ВГСЧ не имеет должной подготовки и оснащения для предотвращения и ликвидации подобных аварий.

НИИГД «Респиратор» совместно с рядом других организаций выполнили научные работы по определению защитной способности против хлорбензола и

других вредных химических веществ высокой концентрации, обнаруженных в горных выработках шахт, имеющихся в угольной промышленности средств защиты органов дыхания и поиску индивидуальных противогазотепловых средств, существующих в стране и за рубежом. Установлено, что применяемые штатные и специальные (общевойсковые) средства (противогазы, респираторы, костюмы) не обеспечивают полной защиты горноспасателей. Хлорбензол, являясь сильнодействующим растворителем органических соединений, легко проникает через ткани, несколько хуже через резину и материалы на ее основе.

Используемые горноспасателями в этих условиях одни из лучших в мировой практике защитные химические костюмы типа «Трелльчем» с воздушными дыхательными аппаратами «Спироматик» шведской фирмы «Интерспирс», имеющие паспортную стойкость в среде с парами хлорбензола 8 ч, с запасом воздуха аппаратами в течение 25-45 мин (в зависимости от тяжести выполняемой работы), оказались не достаточно эффективными, ввиду малого срока защитного действия, в том числе, от температуры окружающей среды, которая в горных выработках шахт находилась в пределах от 36 до 40°C. В связи с этим, комиссией по расследованию группового несчастного случая на шахте «Углегорская» был установлен порядок отбора проб воды и воздуха; к их анализу кроме лабораторий ГВГСС привлечены, в частности, Горловская и Донецкая санэпидемстанции, Институт физико-органической химии АН Украины, создана аварийная группа по инвентаризации системы водосброса, по разработке и осуществлению мер предупреждения попадания вредных веществ в поверхностные водоемы.

Вероятность повторения подобных аварий довольно возможна. По оценкам НИИГД «Респиратор» только в угольной промышленности около половины шахт могут стать объектами химического загрязнения. Поэтому, для повышения уровня безопасности подземных предприятий Горловско-Енакиевского района комиссия обязала, в частности, определить надежность имеющихся отечественных и зарубежных средств защиты, разработать средства комплексной защиты горнорабочих и горноспасателей от токсичных веществ, поступающих в рудничную атмосферу и воду, а также соответствующие дополнения к «Правилам безопасности в угольных шахтах» и к будущему «Уставу ГВГСС по организации и ведению горноспасательных работ».

Проведенные в аварийных шахтах измерения выявили в атмосфере горных выработок токсичные вещества с максимальной зарегистрированной массовой концентрацией ( $C_B$ ), предельно допустимой концентрацией ( $C_D$ ) по ГОСТ 12.1.005-88 и коэффициентом токсичной опасности ( $K_{TO}$ ), которые, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

## Характеристика токсичных веществ

Наименование токсичного вещества	$C_B$ , мг/м <sup>3</sup>	$C_D$ , мг/м <sup>3</sup>	$K_{TO}$
Ацетон	30600	200,0	153,0
Бензол	900	5,0	180,0
Стирол	74	5,0	15,0
Толуол	500	50,0	10,0
Фенол	2	0,3	6,7
Формальдегид	4	0,5	8,0
Хлорбензол	16690	50,0	334,0

При наличии в окружающей среде одного токсичного вещества

$$K_{TO} = C_B / C_D, \quad (1.1)$$

а нескольких вредных веществ однонаправленного действия

$$K_{TO} = \sum_{i=1}^n C_{Bi} / C_{Dl} = \sum_{i=1}^n K_{TOi}, \quad (1.2)$$

где  $n$  – количество токсичных газов.

Данные приведенной таблицы показывают, что наиболее опасным является наличие в данной окружающей среде хлорбензола ( $K_{TO} = 334$ ), за которым следуют бензол, ацетон и т.д.

Эти результаты по концентрации токсичных веществ с учетом зарегистрированной температуры окружающей среды в аварийных горных выработках шахт 40 °С будут в дальнейшем использованы для исследования нестационарных процессов тепломассопереноса в системе «окружающая среда – газотеплозащитный костюм – человек», определения конструкции, теплофизических характеристик материалов слоев и времени защитного действия.

Рассмотрим существующие методы и технические средства противогазотепловой защиты горнорабочих в Украине, за рубежом и членов аварийноспасательных подразделений при ведении работ в экстремальных микроклиматических условиях.

## **2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ**

Выполнение аварийно-спасательных работ в подземных выработках шахт требует от личного состава горноспасательной службы быстрого реагирования на аварийные ситуации, принятия эффективных технических решений, высокой профессиональной выучки и связано с высокими физическими и психоэмоциональными нагрузками на организм горноспасателя. Энергозатраты при работе горноспасателей в зоне повышенных температур (ЗПТ) могут достигать больших значений и вызывать возникновения теплового перенапряжения организма, могущего привести их к тепловому удару. Энергозатраты в этих условиях колеблются от 320 Вт при движении в разведку по горизонтали в полный рост и до 700 Вт при транспортировке пострадавшего вверх по выработке с углом наклона 70 градусов и ее высоте 0,6 м. При работе на месте, связанной с разборкой завала, энергозатраты достигают 640 Вт и выше. При проходке горных выработок для спасения пострадавших энергозатраты горноспасателя могут достигать 1000 Вт и более.

В зависимости от уровня температуры воздуха в ЗПТ и других исходных условий эти средства могут иметь различное схемное и конструктивное исполнение.

Работа горноспасателей в экстремальных микроклиматических условиях является особенно тяжелой и связана с опасностью возникновения теплового перенапряжения организма, которое может привести к тепловому удару, сопровождающейся, как правило, самопроизвольным исключением их из респиратора и отравлением токсичными газами. Наиболее характерный случай произошел в 1980 г. при ликвидации последствий взрыва метано-воздушной смеси и пыли на шахте Горская Луганской обл. Работы в шахте велись при температуре воздуха около 41°C с высокой физической нагрузкой. В результате перегревания организма получили 14 горноспасателей, а ликвидация аварии длилась более двух недель. Подобные случаи, хотя и меньшего масштаба, имели место также на шахтах «Южнодонбасская №3» (1994 г.), «Комсомолец Донбасса» (1996 г.), «Краснолиманская» (2004 г.) и др.

Ведение аварийно-спасательных работ в таких условиях связано с высокими физическими и психо-эмоциональными нагрузками на организм и требует от личного состава горноспасательной службы принятия эффективных технических решений, высокой профессиональной подготовки. Энергозатраты горноспасателей в этих условиях составляют: от 320 Вт при движении в полный рост по горизонтальным выработкам, до 700 Вт при транспортировке пострадавшего вверх по выработке с углом наклона 70 ° и ее высоте 0,6 м. При работах на месте, связанных с разборкой завалов, энергозатраты горноспасателей могут составлять 1000 Вт и выше.

Следовательно, при ведении аварийно-спасательных работ горноспасатели должны быть оснащены, кроме аппаратов защиты органов дыхания (изолирующих респираторов), средствами индивидуальной противогАЗОТЕПЛОВОЙ защиты.

Основным опасным фактором рудничной атмосферы при аварии в шахте является непригодность ее для дыхания, а поэтому главное средство индивидуальной защиты горноспасателя – изолирующий регенеративный респиратор с панорамной маской.

В настоящее время горноспасательная служба оснащена отечественными респираторами со сжатым кислородом с 4-часовым и 2-часовым временем защитного действия (Р-30 и Р-34), которые серийно выпускаются более 30 лет, а также респираторы с химически связанным кислородом, обладающие улучшенными микроклиматическими условиями дыхания. Однако, в связи с рядом серьезных эксплуатационных недостатков, они пока не получили широкого применения. Респираторы используются самостоятельно, а также в составе противотепловой одежды, и являются средствами индивидуальной противогазотепловой защиты горноспасателей.

Начиная с 30-х годов прошлого столетия на оснащении горноспасательной службы находились отечественные респираторы со сжатым кислородом с 4-х и 2-х часовым временем защитного действия. В процессе совершенствования респираторов примерно каждые 15 лет осваивали производство новых более совершенных моделей, последние из которых Р-30 и Р-34, выпускаются около 30 лет и достаточно удовлетворяют горноспасательную службу.

Если противотепловая одежда по своей конструкции не обеспечивает защиту органов дыхания, респиратор применяется как составная часть средства индивидуальной противогазотепловой защиты.

Средства индивидуальной противотепловой защиты человека известны давно, однако для применения в горноспасательном деле угольной промышленности бывшего СССР они начали разрабатываться в 50-е годы прошлого столетия. По своей сути это противотепловая одежда, изготовленная из теплоизолирующего материала, предотвращающего проникновение тепла из внешней нагревающей среды в организм человека. Под слоем одежды располагаются те или иные технические устройства, обеспечивающие при помощи хладагента поглощение метаболического тепла, продуцируемого организмом человека в результате его жизнедеятельности и полезной физической работы, теплота, проникающей извне через слой теплоизоляции, а также поступающего в организм в результате дыхания в респираторе. В некоторых типах противотепловой одежды защита органов дыхания осуществляется регенеративным респиратором, применяющимся в комплекте с ней. Другие типы одежды имеют встроенную систему защиты органов дыхания. Поскольку защита органов дыхания горноспасателя необходима при любой подземной аварии, здесь и ниже все типы противогазотепловой одежды будем сокращенно обозначать ПГТО, а противотепловой – ПТО. В зависимости от конкретного принципа работы и устройства одежды известны различные их типы.

По степени зависимости от стационарной базы, с которой ведутся аварийно-спасательные работы, ПТО может быть автономной, полуавтономной и шланговой. В автономной одежде все ее элементы размещены на человеке, который может передвигаться в ней на значительное расстояние от базы. В полуавтономной ПТО переносимым человеком груз в виде контейнера с охлаж-



дающим устройством связан с человеком в одежде коротким двойным шлангом, позволяющим горноспасателю перемещаться в пределах рабочего места. В шланговой ПТО на человека надета противотепловая одежда, а стационарное охлаждающее устройство связано с ней шлангом, ограничивающим передвижение. Шланговая ПТО практически не нашла применения в горноспасательном деле

Для нужд горноспасательного дела разрабатывали в тех или иных объемах применяли на практике исключительно автономную и отчасти полуавтономную ПТО. К первым поколениям такой ПТО, которые стали уже достоянием истории развития данного вида защитной техники, относятся автономные аппарат ГТЗА-3, скафандр «Гатескаф», костюм «Прометей», полуавтономный костюм ГТК. Тенденция использования в горноспасательном деле исключительно автономных средств защиты была продолжена и далее (костюмы ПТК-100, ТК-60, КР-150, противотепловые куртки ТК-40).

По виду применяемого хладагента известны отечественные модели ПТТО с обдувом пододежного пространства охлажденным воздухом, с сублимирующимся углекислотным льдом (ГТЗА-3), с испаряющимся сжиженным газом (жидкий воздух в «Гатескафе» и КР-150 и жидкий аммиак в «Прометее». Однако наибольшее распространение в качестве хладагента получил тающий водяной лед, размещенный либо в отдельном резервуаре (полуавтономный ГТК, ПТК-100), либо в виде водоледных охлаждающих элементов, размещенных локально в пододежном пространстве (куртка ТК-40, костюм ТК-60).

В МакНИИ разработаны неавтономные средства индивидуальной противотепловой защиты горнорабочих с ограниченной рабочей зоной с использованием сжатого воздуха и вихревого генератора холода. Опытная партия внедрена на шахте им. К.Е. Ворошилова ПО «Артемуголь», однако дальнейшего применения они не получили. В то же время в работах институтом сделан вывод о необходимости разработки для горнорабочих автономных средств с использованием водоледных аккумуляторов холода.

По способу теплосъема с поверхности тела человека наиболее эффективна так называемая «водяная рубашка», состоящая из большого количества тонких эластичных пластмассовых трубок, облегающих все тело и голову человека или его часть. По трубкам специальным насосом прокачивается хладоноситель – охлажденная жидкость. Такое техническое решение разработчики заимствовали из конструкции космических скафандров и применили в полуавтономном ГТК и «Прометее». Сложность данного технического решения заключалась, в частности, в том, что для приведения в действие насоса для циркуляции хладоносителя требовался автономный электро- или пневмопривод, что усложняло конструкцию костюма, увеличивало его массу и уменьшало надежность. С этой точки зрения оригинальным и довольно удачным было применение «водяной рубашки» в противогазотепловом костюме ПТК-100, опытная партия которых эксплуатировалась в некоторых подразделениях ГВГСС вплоть до 2000 г. В этом костюме для приведения в действие циркуляционного насоса используется мускульная энергия ног горноспасателя, работающего в костюме. Для этого в сапогах под пятками человека установлены пневмокамеры, которые горно-

спасатель попеременно сжимает при ходьбе или при переступании с ноги на ногу и тем самым приводит в действие насос.

Для защиты органов дыхания костюм ПТК-100 укомплектован штатным регенеративным респиратором Р-30, размещенным под теплоизолирующей оболочкой, высокочастотной переговорной связью и головным светильником. Общая масса снаряжения, надетого на человека, составляет около 38 кг, а время защитного действия костюма при температуре шахтного воздуха 100 °С равно 60 мин. Тем не менее, такое техническое решение способа теплосъема оказалось слишком сложным для горноспасателей по своему устройству, условиям эксплуатации и из-за большой массы снаряжения и в дальнейшем в противогазотепловых костюмах не применяли.

Наиболее простым, надежным и эффективным способом теплосъема является размещение под противотепловой одеждой самого хладагента в виде водолеяных охлаждающих элементов (ОЭ) с небольшим гарантированным зазором относительно поверхности тела (противотепловые костюмы ТК-60, противотепловые куртки ТК-40). Охлаждающие элементы указанных типов ПГТО, получившие название ОЭ-1, были выполнены в виде плоских ампул из полиэтилена высокого давления низкой плотности с пробкой, в которые залита вода. После замораживания элементы закладывали в пластмассовые решетчатые ячейки, прикрепленные к подкладке противотепловой одежды. В костюме ТК-60 использовали 32 охлаждающих элемента. Общая масса снаряжения, включая респиратор, составляла 36 кг, что обеспечивало время защитного действия 80 мин при температуре шахтного воздуха 60 °С и 4 мин при температуре 100 °С. Соответственно в куртке ТК-40 использовали 13 элементов ОЭ-1, общая масса снаряжения составляла 6,4 кг, а время защитного действия при температуре 40 °С равно 40 мин. При температуре воздуха 60 °С и его относительной влажности 100% куртка ТК-40 обеспечивала время защитного действия 8 мин. при незащищенной от воздействия теплоты голове. Указанные типы ПГТО сыграли важную роль в дальнейшем развитии средств индивидуальной противогазотепловой защиты горноспасателей.

Общим существенным недостатком ТК-60 и ТК-40 явилась конструкция используемых в них охлаждающих элементов ОЭ-1. Их оболочка оказалась очень жесткой при замораживании воды, они выпучивались и плохо прилегали к телу горноспасателя, затрудняя наклоны и повороты туловища. Кроме этого, ОЭ-1 имели толстые стенки оболочек, а поэтому их масса составляла 12,5% от общей массы элементов вместе с залитой в них водой. Другим существенным недостатком куртки ТК-40, выявившимся при ее испытаниях и эксплуатации, явилось отсутствие охлаждения головы горноспасателя, что привело к существенному снижению времени ее защитного действия, особенно при температурах от 40 °С до 60 °С.

Эксплуатация опытных партий костюмов ТК-60 и курток ТК-40 в горноспасательных подразделениях подтвердила, что совершенствование этих средств противотепловой защиты необходимо начинать с разработки нового, более эффективного и удобного в использовании водолеяного охлаждающего элемента с применением его также для защиты головы горноспасателя.

По степени изоляции поверхности тела человека от нагревающей окружающей среды известны ПТО как с защитой головы, так и без ее защиты (куртки, костюмы). Костюмы рассчитаны обычно на применение при температуре шахтного воздуха (80...150°C), а противотепловые куртки – до 60°C. Время защитного действия противотепловой одежды зависит от многих факторов: температуры окружающей среды, степени изоляции тела человека от этой среды, типа, массы хладагента и т.д.

Обслуживание каждого из упомянутых типов ПТО осуществляется при помощи стандартного или специально разработанного оборудования. В частности, для эксплуатации существующей в настоящее время ПТО, в которой применяются водоледажные охлаждающие элементы, для их замораживания используются стационарные морозильные камеры, которые находятся на оснащении подразделений ГВГСС. В связи с тем, что при сложных авариях и продолжительных работах в ЗПТ экстренно требуется очень большое количество ОЭ, разработан мобильный комплекс противотепловых средств (МКПС) «Зима-А» на автомобильном ходу. Он состоит из резервуара с жидким азотом АГУ-3м, установленном на автомобиле, и прицепа, на котором размещены морозильная установка для замораживания охлаждающих элементов и вспомогательное оборудование. Замораживание охлаждающих элементов производится по пути на аварийную шахту и на ее поверхности, а далее ОЭ доставляются к месту работ в вагонетке-термосе и в специальных контейнерах (К-1). В настоящее время в подразделениях ГВГСС сохранилось в рабочем состоянии три таких комплекса.

Противотепловая одежда с использованием водоледажных ОЭ получила широкое распространение в большинстве зарубежных стран. Известен патент США с размещением их в специальных карманах спецодежды. Подобная противотепловая одежда применяется за рубежом, как при аварийных работах, так и в штатных технологических процессах, например, в глубоких рудниках на юге Африки, где в непосредственной близости от рабочих мест расположены морозильные камеры, в которых в постоянной готовности к применению находится обменный фонд жилетов, что обеспечивает их высокую мобильность. Значительный интерес представляет жилет с секционными водоледажными ОЭ, прилегающими к груди и спине человека, применяющийся в горноспасательной службе ФРГ. Такие жилеты входят в обязательное оснащение горноспасателей и применяются в зависимости от реальной аварийной ситуации, а их эффективность изучена в процессе большого экспериментального исследования в институте горноспасательного дела. Кроме этого, в ФРГ фирмой «Дрегерверк» разработан противотепловой костюм «Бербау», в котором в качестве хладагента используется углекислотный лед, а защита дыхания осуществляется системой регенерации воздуха с использованием химически связанного кислорода. Описаны положительные результаты испытания опытного образца, однако данные о его применении не приводятся.

Техническая характеристика моделей противогазотепловой одежды, разработанных ранее в бывшем ВНИИГД, и противогазотеплового костюма «Бергбау» (ФРГ) приведена в табл.2.1.

Анализ различных типов ПГТО, разработанных и применявшихся ранее горноспасателями, показывает, что ни один из них не удовлетворяет полностью требованиям практики ведения работ в ЗПТ в рассмотренных выше условиях. Поэтому потребовалось разработать типоряд средств индивидуальной противогазотепловой защиты для ведения аварийно-спасательных работ в различных экстремальных микроклиматических условиях.

Таблица 2.1

## Техническая характеристика разработанной ранее ПГТО

Модель ПГТО, раз- работчик	Год соз- дания	Мас- са, кг	Рабо- чая темпе- ра- тура, °С	Время защитного действия, мин	Хлада- гент	Хладо- носи- тель	Запас холо- да, Дж
«Гатескаф» НИИГД	1965	40	100	60	Жидк. воздух	Воздух	4410
ПГТК, НИИГД	1969	50	140	60	Вод. лед	Вода	4310
«Прометей» НИИГД	1976	36	160	60	Жидк. NH <sub>3</sub>	Вода	4050
ТК-40, НИИГД	1982	6,4	40	40	Вод. лед	Вода	2180
ТК-60, НИИГД	1982	36	60	80	Вод. лед	Вода	4000
ПТК-100, НИИГД	1987	38	150	45	Вод. лед	Вода	2580
«Бергбау», (ФРГ)	1982	37	70	60	Тверд. CO <sub>2</sub>	Сил. масло	4230

В России горноспасатели имеют на оснащении противотепловые куртки типа «ДОН», разработанные НИИГД «Респиратор», костюмы ТК-60М и ПТК-80. Куртка «ДОН» состоит из трехслойного жилета с полиэтиленовыми решетчатыми карманами для ОЭ-2 и куртки от спецодежды, которая надевается на жилет, и по технической характеристике практически аналогична куртке ТК-50.

В семидесятых годах прошлого столетия ученые МакНИИ разработали для горнорабочих комплект теплозащитный шахтерский «Комфорт». Сжатый воздух от шахтной пневмосети подается в устройство для очистки воздуха от масла, влаги и механических примесей, поступает по шлангу в вихревую трубу, после которой направляется в перфорированный полиэтиленовый трубопровод пододежного пространства, создавая микроклимат для туловища и органов дыхания при температуре окружающей среды до 40°С. Из-за отсутствия автономности, так как основной трудовой процесс горнорабочих обеспечивается на ограни-

ченной площади (крепильщики, машинисты горных машин и т.п.), и на многих шахтах сжатого воздуха, комплект «Комфорт» не нашел промышленного применения.

В 1995 г. в НИИГД «Респиратор» разработана противопылетепловая куртка КПШ-40 с капюшоном и водолеяной системой охлаждения, аналогичной куртке ТК-50, которая позволяет защитить горнорабочего от воздействия температуры до 40 °С и запыленности окружающей среды до 200 мг/м<sup>3</sup>. Однако куртки КПШ-40 массой около 7 кг в условиях шахты, как утверждали некоторые специалисты, можно эффективно применять, в основном, при проведении и погашении выработок, а поэтому также не нашли промышленного внедрения.

За рубежом работы по созданию средств индивидуальной противотепловой защиты для горнорабочих, кроме Германии, ведутся в Чехии, Англии, Бельгии. Однако о промышленном их применении информация отсутствует.

Сотрудниками НИИ техники безопасности в химической промышленности (НИИТБХП, г. Северодонецк Луганской обл.) проведены значительные мероприятия и НИОКР по улучшению качества существующих или созданию новой специальной одежды для различных профессий химических и нефтеперерабатывающих предприятий [2,3]. Здесь разработана классификация кислотно-защитной одежды по функциональному назначению, согласно которой специальные костюмы, способные защитить от капельножидкой фазы агрессивной среды при повседневной их эксплуатации, относятся к группе А. К группе Б относится комплект, содержащий специальный костюм группы А плюс изделия из химостойкого материала с полимерным покрытием, способный защитить от воздействия объемно-жидкой фазы агрессивной среды различной концентрации; разработаны методы и устройства по определению химостойкости проб специальных материалов с полимерным покрытием и воздействию минеральных кислот в зависимости от их концентрации, времени экспозиции и температуры раствора; по изучению долговечности и ползучести проб текстильных материалов в процессе воздействия растворов минеральных кислот; по определению проницаемости проб капельно- и объемно-жидкой фазой различных минеральных кислот (летучих и нелетучих), находящихся при заданной температуре; по технологической обработке проб спецматериалов, комплектующих узлов и деталей для изолирующих костюмов (ИК) газообразным и жидким хлором и аммиаком; по определению проницаемости проб спецматериалов, комплектующих узлов и деталей для ИК к воздействию объемно-жидкой и газовой фазы указанных агрессивных сред; разработаны методические основы испытания ИК на герметичность, программа которых состоит из трех этапов: лабораторного, стендового и полигонного. Лабораторные испытания ИК проводятся в специальном боксе с помощью модельных газов, аэрозолей и жидкостей. Для стендовых испытаний изготовлены специальные камеры: «Хлор-1», «Аммиак» и «Универсал-М», где в качестве агрессивных сред использованы жидкий и газообразный хлор и аммиак. Полигонные испытания проводятся в реальных условиях с помощью испытателей. Герметичность ИК за контрольное время испытаний (2400 с) определяется качественно с помощью индивидуального комплекта (костюм, перчатки, носки, шлем) и количественно – с помощью постоянно проводимого анализа воздуха подкостюмного пространства. Критерием оценки герметичности является время, за которое не про-

исходит проникновение агрессивной среды или происходит, но не превышающее ПДК на исследуемое вещество; разработаны конструкции и изготовлены образцы ИК, которые согласно схеме наиболее вероятного поэтапного развития аварийной ситуации на химическом предприятии и концепции защиты бойцов-газоспасателей, должны быть отличными друг от друга по защитным свойствам и функциональному назначению: изготовлены боевые изделия ИК-АЖ, относящиеся к типу АА и КИО-2, а также защитные жилеты ЖЗ-1 и ЖЗ-2. Формирование защитного комплекта типа БА проводится по схеме: КИО-2+АСЖО+ЖЗ-1 или КИО-2+АСЖО+ЖЗ-2, типа ВА – КИО-2+АСЖО (автономная система жизнеобеспечения).

Лабораторные испытания разделены на два этапа. На первом этапе оценка герметичности всех изделий проведена с помощью модельного газа, в качестве которого использованы пары уксусной кислоты, концентрация которых равна 75 % по объему бокса. После проведения этих исследований бокс поочередно заправляли газообразным аммиаком и хлором до 65 % концентрации. В течение 60-ти минут, контролируя подкостюмное пространство, определяют следы или концентрацию газообразных веществ в ИК.

Отличие стендовых испытаний от лабораторных состоит в том, что для изучения защитных свойств изделие подвергается воздействию конкретных агрессивных сред в условиях максимально приближенных к реальным: по определению защитных свойств изделий к воздействию хлора проводились на специально изготовленном и оборудованном контрольной аппаратурой стенде «Хлор-1», к аммиаку – на установке «Аммиак-1».

Объектом полигонных испытаний, проведенных по специальной программе, согласно которой испытатели должны подтвердить результаты предыдущих испытаний, определить концентрацию агрессивной среды в загазованной зоне, проверить степень сочетаемости АСЖО (АСВ-2 и КИП-8) с ИК, явились два изделия типа ИК-АЖ, изготовленные НИИТБХП. Испытания проведены в два этапа по следующей схеме: а) - вход в загазованную зону разлива 6000 кг аммиака и пребывание в ней в течение 20-ти минут; б) - работа в зоне разлива аммиака в течение 40 минут и контроль устойчивости изделий и комплектующих деталей к агрессивной среде. В результате проведенных испытаний серийно выпускаются ИК со следующей характеристикой (табл. 2.2).

Таблица 2.2

## Защитные характеристики ИК по аммиаку и хлору

Наименование изделия изолирующего типа	Время защиты, с			
	жидкий аммиак (облив)	газообразный аммиак	жидкий хлор (облив)	газообразный хлор
ИК-АЖ	Ограничено временем работы АС ЖО	Ограничено временем работы АС ЖО	1200	3600
КИО-2	600	3600	—	2400
КИО-2+ЖЗ-1	1200	3200	600	2400
КИО-2+ЖЗ-2	1200	3600	600	2400



Эксперименты по оценке физиолого-гигиенических показателей ИК в комплекте с дыхательным аппаратом проводили в микроклиматической камере бывшего ВНИИГД НПО «Респиратор» при температуре 20, 35 и 40 °С и относительной влажности воздуха 66 %. Испытатели были одеты в костюмы ИК-АЖ в комплекте с дыхательными аппаратами АИР-224 (два человека) и Р-30 (один человек) и выполняли работу средней тяжести: десятиминутные нагрузки чередовались с пятиминутным отдыхом. Допустимое время работы определялось по критериям: частота сердечных сокращений (ЧСС) – 150 мин<sup>-1</sup>, внутренняя температура тела – 38,0 °С. Работа продолжалась до полного израсходования воздуха в аппарате АИР-224 или до достижения теплового состояния организма, которое характеризовалось учащением сердечных сокращений до 170 мин<sup>-1</sup>, а также повышением внутренней температуры тела до 38,6 °С.

В результате получено, что в изделии ИК-АЖ с аппаратом АИР-224 и температуре воздуха 20 °С можно выполнить работы в течение 40 мин; при 35°С – 30 мин, при 40°С – 25 мин. При использовании дыхательного аппарата Р-30 – 60; 50 и 40 минут, соответственно.

Разработанная НИИТБХП газозащитная одежда не может быть использована при температуре воздуха 40 °С, ввиду недостаточного времени ее защитного действия, и тем более, для защиты от таких высоких концентраций хлорбензола, ацетона, бензола и т.д., обнаруженных в горных выработках шахт.

На многих предприятиях химической промышленности России применяют так называемые пневмокостюмы типа ЛГ-У или ЛГ-УС, которые изготавливаются фирмой «Изотоп» и представляют собой изолирующий костюм с принудительной подачей воздуха для дыхания и вентиляции подкостюмного пространства. В качестве материала для изготовления изделий применяется пленка из поливинилхлорида (ПВХ) или прорезиненная ткань, где в качестве лицевого покрытия используется полимер. Указанные изделия предназначены для ремонтных, аварийных дезактивационных работ в условиях загрязнения окружающей среды радиоактивными (пылеобразными) веществами.

Согласно имеющимся сведениям практически все зарубежные химические предприятия пользуются услугами фирм, разрабатывающих и выпускающих изолирующие костюмы различного ассортимента и назначения. Так, фирма «Фирепель Продукт» (США) предлагает изолирующие изделия для защиты от воздействия целой гаммы химически опасных веществ. Предприятиями компании «МСА Канада ИНС» (Канада) выпускается специальная защитная одежда и снаряжение для персонала аварийно-спасательных служб. Изолирующие костюмы этой компании изготавливаются в двух вариантах: с двух, трехслойным наружным покрытием и встроенной дыхательной маской.

Фирма «Дрегерверк» изготавливает и поставляет новые изолирующие защитные костюмы различных типов, которые предохраняют от воздействия вредных химических веществ. Для изготовления костюмов применяется многослойная газонепроницаемая ткань. Фирма «Треллеборг» (Швеция) производит различные изолирующие костюмы для полной защиты работающего от опасных веществ. Изделия типа «Треллхем Бутил экстра» изготавливаются из спе-

циального материала, покрытого бутилкаучуком, и предназначены для проведения работ в наиболее тяжелых условиях аварийной ситуации, а костюм типа «Треллхем Супер экстра», изготовленный из бутил каучука в сочетании с «ви-тоном», применяется в менее опасных условиях. Кроме того, указанная фирма выпускает изолирующие костюмы, изготовленные из пленки ПВХ и предназначенные для ведения поисково-спасательных и аварийно-восстановительных работ, контрольных проверок и технического обслуживания промышленных установок в условиях действия опасных факторов.

Фирма «ЕКСАФЕР» (ФРГ) разработала новый изолирующий костюм, защищающий от пламени, теплового излучения, искр, минеральных кислот, жидких и газообразных химических веществ, а «Дрегерверк АГ» (ФРГ) – газотеплозащитный костюм, предназначенный, в основном, для защиты рабочих химических предприятий от одновременного воздействия особо опасных газообразных веществ и повышенных температур, а также серию изолирующих костюмов, защищающих от действия агрессивных жидкостей и газов. Применяемый материал для изготовления изделий – многослойный, основанием которого является высокопрочная синтетическая ткань, с лицевой стороны покрытая «ви-тоном», а с изнаночной – неопреном.

Фирма «Генрих ОГЦ» разработала защитную одежду от одновременного воздействия высоких температур и ядовитых химических веществ. Для повышения удобств в работе изделие снабжено панорамным стеклом, химически- и термоустойчивыми сапогами и перчатками. Сведения о специальном материале отсутствуют. Также имеются сведения, что американская фирма «Харкоте» разработала новый изолирующий костюм «8202 СЦВ», обеспечивающий надежную защиту при проведении аварийных работ на химическом предприятии с одновременным воздействием высоких температур. В качестве материала применяется химически устойчивый ПВХ.

Английская фирма «Инерспиро ЛТД» информирует о защитном костюме изолирующего типа, изготовленного из армированной полиамидной ткани с полимерным покрытием из «витона», а совместно с компанией МСА (Британия) разработала газонепроницаемый костюм, защищающий от 600 видов химических веществ, в том числе и от жидкого хлора.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в отличие от нашей страны, за рубежом существует большое количество фирм, которые совместно с научно-исследовательскими центрами разработали и создают новые средства индивидуальной защиты, пользующиеся спросом далеко за своими пределами. Сведения о перечисленных специальных материалах, технология их изготовления в анализируемой литературе отсутствуют, а стоимость костюмов, в частности типа ИК-АЖ, выпускаемых фирмой «Треллеборг», равна 2500 долларов США.

Безопасность деятельности человека в условиях высоких температур обеспечивается комплексом нормативно-профилактических мероприятий, направленных на регламентацию продолжительности и тяжести труда: параметров микроклимата, повышение физической и психологической подготовленности и тепловой устойчивости, применение средств индивидуальной противотепловой защиты. В аварийной обстановке нормализация микроклимата на месте

ведения аварийно-спасательных работ, как правило, невозможна и на первый план выступают мероприятия по нормированию труда и использованию индивидуальной защиты.

Для оказания помощи при перегревании рекомендуется комплекс мероприятий, включающих смачивание водой и обкладывание пакетами с охлаждающей смесью ОС-450 или охлаждающими элементами ОЭ-2 открытых участков тела и в первую очередь голову пострадавшего.

Методы охлаждения при оказании помощи пострадавшим от перегрева организма, такие, как погружение их в ванну с ледяной водой, заворачивание во влажные простыни или обтирание губкой, смоченной в спирте, с последующим обдуванием вентиляторами, помещение в комнату с кондиционированием воздуха, приведены в работах.

В экстремальных условиях шахт зачастую невозможно использовать эти методы, а эффективность их применения недостаточна.

В институте биофизики бывшего Минздрава СССР были проведены исследования по изучению возможности экстренного выведения человека из состояния гипертермии путем локального охлаждения. Под воздействием эргодической нагрузки испытуемых-добровольцев доводили до предельного теплового состояния, а затем в покое с помощью панелей охлаждения трубчатого типа площадью 0,2 м<sup>2</sup> охлаждали различные участки тела. Была показана возможность выведения человека из предельного состояния путем локального охлаждения. Более выраженный эффект получен при теплосъеме с головы и спины. Охлаждение участков, расположенных над большими мышечными группами (бедра), оказывало менее выраженное нормализующее воздействие.

Анализ результатов исследований различных авторов по определению интенсивности и физиологической эффективности теплосъема с различных участков тела человека показывает, что охлаждению головы и шеи при гипертермии следует отдавать предпочтение.

Высокая эффективность теплосъема с поверхности головы позволяет применять этот метод для уменьшения тепловой и физиологической нагрузки на организм при высоких температурах окружающей среды. Так, например, шлем с системой кондуктивного теплосъема посредством циркуляции через трубки холодной воды, применяемый вертолетчиками при дежурствах в кабинах вертолетов, где температура воздуха повышалась до 47 °С при относительной влажности 40 %, снижал функциональное напряжение организма примерно на 50 %, снимая с поверхности головы от 10 до 30 % метаболического тепла.

Исследование теплофизической и физиологической эффективности теплосъема показало, что самые хорошие результаты в пересчете на единицу поверхности тела дает охлаждение шеи. Эффект от теплосъема при этом в 2,5 раза выше, чем от охлаждения лица.

Второе по эффективности и удобству размещения панелей теплосъема место после шеи и головы занимают надгрудная и лопаточная области, что объясняется хорошо развитой сосудистой сетью и эффектом влияния на область сердца.

Совместным охлаждением шеи и туловища при перекрытии панелями охлаждения поверхности тела можно достичь уменьшения функционального напряжения организма до 72 %..

Следующее место в ряду зон эффективного охлаждения поверхности тела отводится кистям, предплечьям и голени, что объясняется хорошо развитой в этих частях кожной сосудистой сетью и хорошим представительством терморепцепторов кожных и подкожных сосудов, обладающих тоническим типом активности, которые оказывают рефлекторное влияние на центры терморегуляции.

Стопы также обладают перечисленными свойствами в отношении участия их в терморегуляции. Однако охлажденная за счет теплообменников кровь, оттекающая от стоп, успевает значительно нагреться при движении к ядру тела и, в связи с этим, в условиях внешней тепловой нагрузки теплоотвод со стоп менее эффективен. При изоляции от теплопритока извне охлаждение стоп дает больший физиологический эффект.

Охлаждение поверхностей тела, расположенных над большими мышечными группами, например, бедер, дает наименьшее выраженное нормализующее физиологическое воздействие в перерасчете на единицу охлаждаемой площади. Это объясняется с позиций худшей поверхностной циркуляции и меньшим представительством терморепцепции.

Особое внимание при гипотермии уделяется голове. Интенсивность обмена веществ в мозге и сопровождающее его теплообразование почти в 10 раз выше, чем в среднем в единицу массы тканей всего тела.

В связи с вышеизложенным, разработка комплексов средств экстренного охлаждения пострадавшего при перегревании велась в направлении создания гипотермического шлема и для охлаждения конечностей.

Первый образец гипотермического шлема состоял из внутренней (трикотажной) и наружной (прорезиненной) оболочек, между которыми располагали перфорированные винилхлоридные трубки, соединенные с коллектором, который через редуктор присоединен к баллону со сжатым воздухом. Охлаждение головы осуществляли воздухом, поступающим к ее поверхности под давлением 0,1 МПа через перфорации в трубках. Воздух, находящийся в баллоне вместимостью  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  под избыточным давлением 22 МПа, обеспечил охлаждение головы в термонеutralной среде в течение 4 мин. Для интенсивного охлаждения головы необходимо было увеличить расход воздуха и вместимость баллона. Однако, увеличение объема баллона привело бы к увеличению общей массы гипотермического шлема и снижению его мобильности. Кроме того, при температуре окружающей среды 30 °С и выше обдув головы таким воздухом не обеспечивает экстренного охлаждения пострадавшего от теплового удара.

Прошел испытания макетный образец комплекта средств с кондуктивной системой охлаждения, в котором в качестве хладагента использован водяной лед, хладоносителя – вода, получаемая от таяния льда, рабочего вещества – сжатый воздух.

Комплект средств состоял из баллона со сжатым воздухом, редуктора, насоса, резервуара с водяным льдом, гипотермического шлема, шины для рук и ног.

Систему циркуляции хладоносителя перед включением заполняли водой, подключали резервуар со льдом, пневмонасос, баллон. При подаче на насос воздуха под давлением 0,1 МПа осуществили циркуляцию воды через гипотермический шлем, шины и резервуар со льдом. При этом, смывая участки тела, вода нагревается, а попадая в резервуар со льдом, охлаждается.

Масса комплекта без баллона равна 21 кг, запас холода 2500 кДж. Такой комплект, ввиду большой массы, не получил одобрения на дальнейшую его разработку.

Наибольшее развитие получила разработка комплекта экстренного охлаждения, в котором в качестве аккумулятора холода использованы водолеянные охлаждающие элементы ОЭ-2, применяемые в противотепловых куртках и костюмах для горноспасателей.

Первый вариант комплекта состоял из гипотермического шлема и закрепляемых на груди, медиальной части спины и конечностях панелей с карманами, в которых помещены ОЭ-2. Шлем и панели включали три слоя материала: наружный (прорезиненная ткань), средний теплоизолирующий (ватин), внутренний (трикотажное полотно). На внутреннем слое закреплены карманы для ОЭ-2 (сетка из хлопчатобумажного материала). На панелях для спины над сеткой закреплены решетки с дистанционными упорами от куртки ТК-50, предотвращающие непосредственный контакт ОЭ-2 с поверхностью кожи.

Масса комплекта равна 4,0 кг, запас холода 1140 кДж, распределение которого находилось в следующем отношении: голова – 22 %, грудь – 13 %, кисти рук – 26 %, голени – 26 %, спины – 13 %.

Второй вариант комплекта включал противотепловую куртку ТК-50, панели для кистей рук, голеней, стоп и гипотермический шлем с водолеянными охлаждающими элементами ОЭ-2. Для уменьшения массы комплекта в панелях и шлеме теплоизолирующий слой не применялся. Комбинации накладок, соединенные в виде беспалой рукавицы, образуют охлаждающую панель для кисти, а восемь накладок – гипотермический шлем, который складывается в пакет размером 220x200x30 мм, а для охлаждения пострадавшего охватывает волосистую часть головы и шею.

Испытания с участием 5-ти испытуемых-добровольцев ГВГСС проводили в тепловой камере НИИГД с температурой воздуха 40 °С и относительной влажностью 100 % при выполнении физической нагрузки с помощью эргометра, ступеньки для степ-теста или переноса кирпичей. При достижении ректальной температуры тела  $t_p = 38,6$  °С или ЧСС = 170 мин<sup>-1</sup>, а также субъективной непереносимости дальнейшей работы и пребывания в зоне высокой температуры, испытуемого укладывали на кушетку в тепловой камере с нормальными микроклиматическими условиями и снаряжали одним из вариантов комплекта экстренного охлаждения. Через каждые 5 мин восстановительного периода регистрировали  $t_p$  и ЧСС, а через 10 мин – температуру кожи  $t_k$  и реограммы исследуемых частей тела, проводили опрос о самочувствии и теплоощущениях. Восстановительный период продолжался до субъективного восстановления работоспособности испытуемого. Затем испытуемый выходил из тепловой камеры, и по

мере снятия снаряжения производили измерения температуры кожи в 35-ти точках с помощью медицинского пирометра, артериального давления, силы кисти и выносливости к статическому усилию. Производили опрос о его самочувствии и оценке комплекта охлаждения.

Результаты испытаний показали следующее. При использовании первого варианта эффективность теплосъема оказалась низкой, однако, за 50 мин охлаждения удалось снизить температуру тела до допустимых пределов. Испытания второго комплекта показали его эффективность. В первую минуту охлаждения исчезло головокружение, беспокойство, тяжесть, а через 4 мин исчезли все субъективные симптомы перегревания и испыталы ощущали тепловой комфорт. К 40-й минуте охлаждения тепловое состояние нормализовалось до допустимых значений. Второй вариант комплекта (10 единиц) внедрен в подразделениях ГВГСС.

Учитывая тот факт, что случаи тепловых поражений горнорабочих и в дальнейшем не будут исключены, требуется подгонка охлаждающих панелей в каждом конкретном случае по размерам частей тела пострадавших, поэтому для сохранения их здоровья и жизни необходимо разработать новый комплект средств экстренного охлаждения с использованием вышеприведенного метода.

Попытки разработки теоретических основ и метода расчета теплофизических и конструктивных параметров ПТО как системы «окружающая среда - средства защиты человек» предпринимались в бывшем ВНИИГ постоянно. Однако, в связи с рассмотрением неадекватных к реальным расчетным схем, не учитывающих, в частности, тепловыделение респиратора и теплообмен за счет испарения пота человека, а также не использованием методов моделирования, результаты этих расчетов, как правило, не давали удовлетворительную погрешность по сравнению с данными экспериментальных исследований. Поэтому основные технические характеристики куртки ТК-40 и костюма ПТК-100, разработанные в то время, получены на основании, в основном, результатов испытаний экспериментальных и опытных образцов этих средств с участием горноспасателей-добровольцев в тепловой камере бывшего ВНИИГД.

Метод расчета, позволяющей определить основную техническую характеристику – время защитного действия костюма при одновременном воздействии температуры и токсичных веществ окружающей среды, отсутствовал.

В начале восьмидесятых годов после случаев группового теплового травматизма горноспасателей, в частности на шахте «Горской», руководством горноспасательной службы была поставлена задача - обосновать, разработать и внедрить на практике методику определения тепловой устойчивости при приеме горноспасателей на работу. В 1983 г. эта задача была решена, и методика широко применялась в подразделениях. При ее массовом применении выявилась и такая особенность: довольно значительное число кандидатов в горноспасатели имели низкие показатели тепловой устойчивости, которую в последующем можно было повысить путем проведения нескольких сеансов акклиматизации в тепловой камере. Эту особенность организма человека, называемую термоадаптивностью, в дальнейшем рекомендовалось учитывать наряду с тепловой устойчивостью. Определение обоих упомянутых показателей при подго-



товке горноспасателей к работе в ЗПТ проводится и в настоящее время. Порядок и содержание подготовки определен действующим нормативным документом, утвержденным бывшим Минуглепромом Украины в 1996 г.

Подготовка начинается на этапе профессионального отбора кандидатов в респираторщики для прохождения службы в ГВГСС. В процессе профотбора у кандидатов в горноспасатели, при отсутствии медицинских противопоказаний, определяют тепловую устойчивость организма и термоадаптивность. После зачисления в респираторщики они уже в качестве стажеров выполняют комплекс упражнений для достижения необходимой тепловой устойчивости.

Респираторщики и командиры ГВГСС выполняют ежемесячную тренировку в тепловой камере учебной шахты, а также еженедельную – в сауне или парной бане, для поддержания достигнутого уровня тепловой устойчивости. Методически тепловые тренировки состоят в выполнении упражнений с дозированной физической нагрузкой на эргометрических приборах или в виде комплексной задачи в учебной шахте. В процессе упражнений осуществляется постоянный контроль динамики внутренней температуры тела (ВТТ) и частоты сердечных сокращений (ЧСС).

Существенными недостатками методики и практики тепловых тренировок является несовершенство оборудования и контрольной аппаратуры тепловых камер в подразделениях ГВГСС. Эксплуатация тепловых камер требует большого расхода электроэнергии, система автоматического поддержания температуры и влажности воздуха на заданном уровне сложна по устройству и в обслуживании. В этом плане значительный интерес представляет методика определения тепловой устойчивости организма горноспасателя в изолирующей (воздухо- и паронепроницаемой) одежде, заменяющая тренировки в тепловой камере, и реализуемая в помещении с нормальной температурой воздуха. Такой костюм должен полностью изолировать человека от окружающей среды, позволяющий создавать на организм требуемую эрготермическую нагрузку и контролировать динамику внутренней температуры тела и ЧСС.

В связи с изложенным, весьма актуальной научно-технической задачей является дальнейшее научно обоснование и отработка новой методики, разработка на ее базе нормативного документа и соответствующего комплекса технических средств для повышения тепловой устойчивости горноспасателей. Это позволит существенно повысить уровень подготовки горноспасателей к работе в экстремальных микроклиматических условиях и при этом отказаться от применения в подразделениях тепловых камер для тренировок.

Анализ состояния вопроса по методам и средствам индивидуальной защиты горноспасателей в экстремальных микроклиматических условиях шахт подтвердил, что в решении данной проблемы достигнуты значительные успехи, однако ряд серьезных ее аспектов, упомянутых выше, до настоящего времени не решены.

Поэтому разработка, создание методов и индивидуальных средств противогазотепловой защиты является актуальной научно-технической проблемой, решение которой позволит повысить эффективность и безопасность ведения работ в экстремальных микроклиматических условиях.

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ГОРНОСПАСАТЕЛЕЙ (ЧЛЕНОВ ВГК ШАХТЫ)

#### 3.1. Комплексная оценка шахтного микроклимата

Как отмечено выше микроклиматические условия, в том числе в шахте характеризуются следующими параметрами: температурой, относительной влажностью и скоростью движения воздуха, а также температурой излучения поверхности выработки. Сочетание значений этих параметров в различных вариантах зачастую вызывает затруднение в качественной и, тем более, в количественной сравнительной оценке микроклимата в различных выработках или в одной и той же выработке. В связи с этим, некоторыми специалистами предпринимались попытки вывести интегральный показатель, который с учетом приведенных выше параметров (всех или некоторых из них) характеризовал бы микроклимат одним численным значением. Однако все эти интегральные показатели были основаны на эмпирических зависимостях и, что самое главное, не учитывали реакции человека на микроклимат окружающей его среды.

Необходимо отметить, что все дальнейшие обозначения величин заимствованы в соответствии с принятыми обозначениями в теориях упругости и ползучести, тепломассопереноса, химии, а также, по мере возможности, в научных источниках, список которых приводится.

Известны, например, следующие интегральные показатели микроклимата [4]:

1) индекс нагревающего воздействия среды  
(*WBGT – Wett Bulb Globe Temperature*, °C)

$$WBGT = 0,7WB + 0,2GT + 9,1DB,$$

где *WB* – температура воздуха по мокрому термометру, °C;  
*GT* – температура шарового термометра, °C;  
*DB* – температура воздуха по сухому термометру, °C.

2) Оксфордский индекс (*WD*, °C):

$$WD = 0,85WB + 0,15DB.$$

Анализ этой формулы показывает, что при увеличении относительной влажности воздуха значение *DB* приближается к значению *WB* и при ее достижении 100 % их значения становятся равны. В этом случае значение Оксфордского индекса определяется температурой мокрого термометра, то есть  $WD = WB$ .

3) Существует ряд интегральных показателей микроклимата, названных «эффективными температурами», которые учитывают температуру, относи-

тельную влажность, скорость движения воздуха и определяются графически по номограммам.

В угольной промышленности некоторых зарубежных стран используются комплексные показатели микроклимата по двум параметрам: по показателям сухого и влажного термометра. Так, по бельгийским правилам допускается работа в шахте при температуре, рассчитанной по зависимости

$$0,9t_B + 0,1t_C = 31^\circ\text{C},$$

где  $t_B, t_C$  – соответственно температура воздуха по влажному и сухому термометрам.

Согласно этой зависимости допускается пребывание горнорабочего в шахте, не выполняющего работу, при температуре  $34^\circ\text{C}$ .

По нормам, принятым в Индии допускается работа в шахте при температуре до  $43^\circ\text{C}$  по сухому и  $27^\circ\text{C}$  по влажному термометрам, что соответствует значению оксфордского индекса  $WD = 29,45^\circ\text{C}$ .

В отличие от существующих интегральных показателей, основанных на эмпирических зависимостях, предлагаем комплексный интегральный показатель Термоиндекс ( $TI$  в баллах), разработанный на базе теплофизических закономерностей и характеризующий тепловое воздействие окружающей среды на организм человека. Термоиндекс выражается следующей зависимостью [4]:

$$TI = (\Phi_C + \Phi_R + \Phi_{EM}) / m^*, \quad (3.1)$$

где  $\Phi_C$  – мощность теплового потока за счет теплообмена конвекцией,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $\Phi_R$  – мощность теплового потока за счет теплообмена излучением,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $\Phi_{EM}$  – мощность теплового потока за счет испарения или конденсации влаги на поверхности тела человека,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  
 $m^*$  – параметр преобразования,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Входящие в формулу (3.1) мощности тепловых потоков выражаются зависимостями

$$\begin{aligned} \Phi_C &= h_C(t_K - t_C) / (1 + 0,155h_C M), \\ h_C &= 3,5 + 5,2v \quad \text{при } v < 1 \text{ м/с}, \\ h_C &= 8,7v^{0,588} \quad \text{при } v \geq 1 \text{ м/с}, \\ \Phi_R &= 4,23 \cdot 10^{-8} ((t_K + 273)^4 - (t_C + 273)^4) / (1 + 0,85M) \\ \Phi_{EM} &= 11 \cdot 10^{-3} h_C (P_K - P_C) / (1 + 0,143h_C M), \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $h_C$  – коэффициент теплообмена конвекцией,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ ;  
 $t_K$  – средневзвешенная температура кожи человека,  $^\circ\text{C}$ ;

$M$  – коэффициент теплоизоляции одежды, КЛО;

$v$  – скорость движения воздуха, м/с;

$P_K$  – парциальное давление водяного пара над поверхностью кожи, Па;

$P_C$  – парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе, Па.

Следовательно, Термоиндекс характеризует, в принципе, тепловой поток, отводящийся от  $1 \text{ м}^2$  поверхности тела человека в окружающую среду или подводящийся к ней из окружающей среды. Для удобства восприятия значение Термоиндекса разделено на  $m^* = 10 \text{ Вт/м}^2$ . В этом случае он в реальном диапазоне микроклимата шахт выражается двузначным числом, причем не в  $\text{Вт/м}^2$ , а в безразмерных величинах (баллах).

На базе разработанной математической модели составлена программа TERMOINDEX для расчета значений  $TI$  на ПЭВМ, в которую вводят следующие величины: температура, относительная влажность и скорость движения воздуха. В качестве постоянных величин приняты средневзвешенная температура кожи, равная  $33^\circ\text{C}$ , и коэффициент теплоизоляции надетой на горнорабочего одежды, равный  $0,25 \text{ КЛО}$  ( $0,04 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ ). Для упрощения принято допущение: температура поверхности стенок выработки равна температуре окружающего воздуха, что, как правило, и наблюдается в реальных шахтных условиях при штатном режиме работы.

В результате расчета значение Термоиндекса, в зависимости от условий микроклимата окружающей среды, может быть положительным (в этом случае теплота отводится от организма человека в окружающую среду), нулевым (теплообмен организма человека с окружающей средой отсутствует) или отрицательным (теплота подводится к организму человека из окружающей среды). В частном случае  $TI = 0$ , если температура окружающего воздуха равна температуре поверхности тела ( $33^\circ\text{C}$ ) и относительная влажность воздуха равна  $100\%$ .

Термоиндекс позволяет оценивать микроклимат в выработках шахт и в других производственных помещениях при отсутствии солнечного излучения.

Как отмечено выше, допустимая температура в угольных шахтах Украины согласно ПБ не должна превышать  $26^\circ\text{C}$ .

В результате исследований установлено, что работа горнорабочими средней тяжести может выполняться без применения мероприятий по ПБ, направленных на предупреждение их организма, при значении Термоиндекса не менее 17 баллов.

Однако горнорабочие выполняют работы, которые относятся к категории не только средней, но и тяжелой и очень тяжелой, а члены вспомогательной горноспасательной команды (ВГК) шахты, кроме этого, при аварийно-спасательных работах зачастую используют аппараты для защиты органов дыхания – изолирующие регенеративные респираторы на сжатом кислороде Р-30 массой  $11,5 \text{ кг}$ . Так, передвижение горнорабочих (членов ВГК) по уклону под углом  $18\text{--}27^\circ\text{C}$  вызывает расход энергии до  $390 \text{ Вт}$ , спуск по лаве пологого залегания пласта угля –  $470 \text{ Вт}$ , передвижение вверх по наклонной лаве на четвереньках или ВГК с пострадавшими на носилках –  $1000 \text{ Вт}$ , что приводит к до-

полнительным тепловым нагрузкам, которые не учитываются в ПБ и выражении (1).

Поэтому необходимо определить предельные значения Термоиндекса с учетом вышеприведенных факторов, при использовании которого будет обеспечено безопасное выполнение работ горнорабочими и членами ВГК.

Выражение для Термоиндекса запишем в виде [5]

$$TI = (\Phi_C + \Phi_R + \Phi_{EM} + \Phi_M + \Phi_P) / m^*, \quad (3.3)$$

где  $\Phi_M$ ,  $\Phi_P$  – мощности тепловых потоков, вызванные выполнением работ различной тяжести и дыханием в респираторе с учетом его массы, Вт/м<sup>2</sup>, определяемые из выражения

$$\Phi_M = q_M(1 - \mu) / F, \quad \Phi_P = \Phi_Y q_m, \quad (3.4)$$

где  $q_M$  – энергозатраты горнорабочих (членов ВГК), Вт/м<sup>2</sup>;

$\mu$  – КПД человека ( $\mu = 0,2$ );

$\Phi_Y$  – мощность теплового потока, вызванная реакцией поглощения CO<sub>2</sub> при дыхании в респираторе, Дж/(гм<sup>2</sup>);

$q_m$  – массовый расход (выделение) диоксида углерода, г/с.

По разработанной программе проведены исследования по определению Термоиндекса, значения которого приведены в табл. 3.1, где температура, влажность и скорость движения воздуха в горных выработках шахт взяты из ранее опубликованных работ. При этом в частности, для тяжелой и очень тяжелой работы горнорабочих (членов ВГК) приняты значения 450 Вт и 550 Вт, соответственно.

Анализ полученных результатов показывает: предельные значения Термоиндекса при выполнении тяжелой и очень тяжелой работы по сравнению с работой средней тяжести (17 баллов) увеличиваются примерно на 22 % и 36 %, а при использовании респиратора на – 14 %, 33 % и 45 %, соответственно; при допустимых по ПБ значениях температуры 23 °С и 24 °С с влажностью воздуха 100 % и скоростью движения 0,15 м/с и 0,25 м/с значения Термоиндекса ниже 17 баллов, что может привести к перегреванию горнорабочих.

Зависимости предельных значений Термоиндекса от энергозатрат горнорабочих (членов ВГК) и горноспасателей при выполнении работ различной тяжести без применения и с применением респиратора приведены на рис. 3.1. При значениях Термоиндекса в 1,4 раза ниже приведенных они достигнут предельного теплового состояния и, если не оказать им немедленную помощь (экстренное охлаждение), может наступить тепловой удар с летальным исходом, что подтверждается на практике.

Таким образом, разработанный метод комплексной оценки шахтного микроклимата, учитывающий совместное влияние различных сочетаний параметров воздуха окружающей среды и тела человека, физических нагрузок и ды-

хание в респираторе, позволяет нормировать режим работы и отдыха горнорабочих (членов ВГК), а, следовательно, обеспечить безопасную их работу.

Таблица 3.1

## Оценка шахтного микроклимата по Термоиндексу

Исходные данные по Правилам безопасности в угольных шахтах			Термоиндекс $TI$ , баллы		
Температура воздуха, °С	Влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	Средняя нагрузка (с респиратором)	Тяжелая нагрузка (с респиратором)	Очень тяжелая нагрузка (с респиратором)
24	75	0,10	17,4 (20,2)	22,5 (26,1)	27,3 (31,7)
25	75	0,26	18,5 (21,5)	23,9 (27,7)	29,1 (33,8)
26	75	0,51	20,1 (23,3)	25,9 (30,0)	31,6 (37,7)
26	75	1,01	25,4 (29,5)	32,8 (38,1)	39,9 (46,3)
23	90	0,10	17,0 (19,7)	21,9 (25,4)	26,7 (31,0)
24	90	0,26	17,8 (20,7)	23,0 (26,7)	28,1 (32,5)
25	90	0,51	19,1 (22,2)	24,6 (28,5)	30,0 (34,8)
26	90	1,01	21,8 (25,3)	28,1 (32,6)	34,2 (39,7)
22	100	0,10	17,2 (20,0)	22,2 (25,8)	27,0 (31,3)
23	100	0,26	18,0 (20,9)	23,2 (26,9)	28,3 (32,8)
24	100	0,51	19,3 (22,4)	24,9 (28,9)	30,3 (35,2)
26	100	1,01	19,9 (23,1)	25,7 (29,8)	31,2 (36,2)
23	100	0,15	16,6 (19,3)	21,4 (24,8)	26,1 (30,2)
24	100	0,25	16,3 (18,9)	21,0 (24,4)	25,6 (29,7)

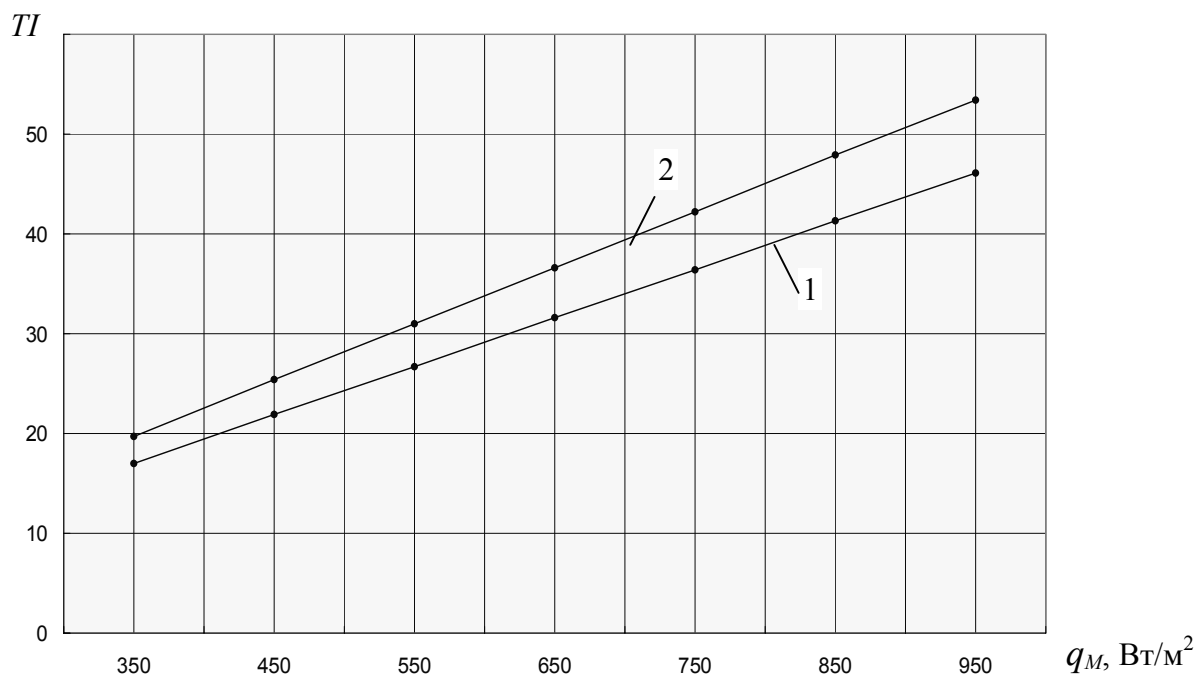


Рис. 3.1. Зависимость предельных значений Термоиндекса от энергозатрат горнорабочих (членов ВГК) и горноспасателей:  
1 – без респиратора; 2 – с респиратором

При существующих температурах в горных выработках шахт (27...38) °С работа горнорабочих без перегревания их организма сверх допустимого по норме возможна при снижении энергозатрат, в противном случае необходимо применять ими средства индивидуальной противотепловой защиты.

### 3.2. Основные требования к средствам индивидуальной противогазотепловой защиты и их схемные решения

Как следует из предыдущего раздела, наиболее целесообразным мероприятием, обеспечивающим эффективность и безопасность работ горнорабочих, при невозможности применения вышеприведенных мероприятий, а также ведения аварийно-спасательных работ членами ВГК шахты в экстремальных микроклиматических условиях, является использование средств индивидуальной противогазотепловой защиты, в том числе средств экстренного охлаждения пострадавших при перегревании, с хладоносителем в виде водолеяных охлаждающих элементов ОЭ-2.

Общая методика исследований состоит в следующем. Рассматривается наиболее общая система «окружающая среда – комплект противогазотепловой защиты – организм человека – физическая нагрузка», структурная схема которой приведена на рис. 3.2.

Окружающая среда и физическая нагрузка являются эрготермической нагрузкой, которая влияет на организм горнорабочего и члена ВГК шахты. Окружающая среда характеризуется температурой, влажностью и скоростью движения воздуха, тепловым излучением, непригодностью для дыхания, воздейст-

вием химических веществ. Физическая нагрузка зависит от вида, условий работы и подразделяется на легкую, среднюю, тяжелую и очень тяжелую.

Комплект противогазотепловой защиты включает в себя защитную одежду и техническое ее обеспечение. Одежда для членов ВГК шахты (горноспасателей) должна состоять из изолирующего газотеплозащитного костюма от воздействия температуры и химических веществ, изолирующего теплозащитного костюма членов ВГК для тушения пожаров в начальной стадии его развития, противотепловой куртки для работы в диапазоне температур  $(27 \dots 60) ^\circ\text{C}$ , изолирующего костюма для экстренного охлаждения пострадавших при перегревании их организма. Последний костюм предлагается для использования пострадавшими горнорабочими, а также применить для них жилет с теплосъемом основной части тела – туловища.

Техническое обеспечение одежды должно состоять из переносного теплоизолирующего контейнера или вагонетки-термоса для длительного хранения ОЭ-2, которые находятся на оснащении подразделений ГВГСС и морозильной установки.





Третья составляющая – организм человека (горнорабочего, члена ВГК) характеризуется физиологическим состоянием: температурами кожи и тела, частотой сердечных сокращений.

Наиболее общим случаем одежды является изолирующий газотеплозащитный костюм, который должен защищать члена ВГК шахты (горноспасателя) от воздействия температуры и химических веществ, частный случай – теплозащитный костюм – температуры окружающей среды и теплового излучения от очага пожара, костюм экстренного охлаждения – от температуры, жилет – от температуры, влажности, скорости движения воздуха.

Для каждого типа одежды будет рассмотрена система охлаждения тех или иных участков тела, определена ее холодопроизводительность (масса хладагента), конструкция газотеплоизолирующей оболочки с учетом количества, расположения, теплофизических характеристик материалов слоев и воздушных прослоек. Основным критерием теплового состояния человека в изолирующих противогазотепловом и теплозащитном костюмах будет являться температура пододежного пространства, в первом дополнительно – время проникновения в него химических веществ, в костюме экстренного охлаждения и в жилете – физиологические параметры: ректальная температура (температура тела) и частота сердечных сокращений. В конечном счете, будет определена основная техническая характеристика одежды – время защитного действия (продолжительность работы) при воздействии окружающей среды и соответствующей физической нагрузке.

В качестве хладагента в защитной одежде будут использованы водоледающие охлаждающие элементы ОЭ-2, эффективно одноразово применяемые горноспасателями в противотепловой одежде, а также для экстренного охлаждения пострадавших в изолирующем костюме.

И, наконец, будет выбрана морозильная установка для замораживания необходимого количества ОЭ-2 с технической характеристикой: рабочий объем, температура в камере, холодопроизводительность, тип.

В соответствии с установившейся многолетней практикой и применительно к специфике аварийно-спасательных работ в шахтах различают три диапазона повышенной температуры воздуха, для каждого из которых существуют свои правила безопасного ведения указанных работ и средства защиты [5].

**Первый диапазон, температура воздуха (27...40) °С.** Он характеризуется тем, что в этих условиях горноспасательные работы допускается выполнять в обычной спецодежде или в спецодежде для горнорабочих глубоких шахт и штатных регенеративных респираторах (например, Р-30) с холодильником вдыхаемого воздуха, снаряженным льдом. Тем не менее, при температуре воздуха выше 30 °С рекомендуется дополнительно к респиратору использование «облегченных» средств противотепловой защиты, например противотепловых: курток ТК-40, которые увеличивают допустимую продолжительность работы горноспасателя в этих условиях более чем в два раза. Поэтому применение курток в диапазоне температуры воздуха (30...40) °С считается наиболее эффективным.

Физическая нагрузка при работе в ЗПТ допускается не выше средней, допустимая продолжительность работы фактически зависит не только от температуры воздуха, но также от еще двух параметров микроклимата. Повышение значения относительной влажности воздуха уменьшает допустимую продолжительность работы. Повышение скорости движения воздуха при его температуре до 35 °С уменьшает вредное воздействие среды на организм горноспасателя, а при температуре выше указанной – увеличивает. Однако указанные обстоятельства не учитывались в действующем издании Устава ГВГСС, поэтому должны быть учтены в новом нормативном документе.

Следует отметить, что первый температурный диапазон является наиболее распространенным при аварийно-спасательных работах. Анализ учета подземных аварий показывает, что из общего объема горноспасательных работ в зоне с повышенной температурой воздуха (около 160 тыс. часов) 89 % выполнено при температуре ниже 40 °С, то есть, в рассматриваемом диапазоне. В нем происходило и большинство случаев теплового травматизма горноспасателей, в том числе с тяжелыми последствиями, причем не вследствие теплового воздействия окружающей среды, а в результате неоправданно завышенной энергетической нагрузки на человека. В связи с тем, что при температуре воздуха (35...40) °С у работающего горноспасателя может создаться ложное субъективное ощущение благополучного теплового состояния организма, такой диапазон температуры воздуха иногда называют «коварным».

В целом первый температурный диапазон можно назвать основным.

**Второй диапазон, температура воздуха (41...60) °С.** Он характеризуется рабочим диапазоном для зоны с повышенной температурой воздуха тем, что в этих условиях необходимы уже защита всего тела горноспасателя от внешнего теплового воздействия и отвод метаболической теплоты при помощи противотепловой одежды (например, костюма ТК-60), которая обеспечивает противотепловую защиту горноспасателя в течение до половины респираторной аппаратуроносимости. Вместе с тем допускается использование для этой цели противотепловых курток (например, ТК-40), которые в первой половине температурного диапазона (40...50) °С еще обеспечивают противотепловую защиту горноспасателя в течение от 40 до 15 минут. Это позволяет выполнить конкретное задание, соответствующее по своей сложности и продолжительности данным условиям. Однако при температуре 60 °С время защитного действия курток снижается до 8 мин и менее, в связи с чем применение их в таких температурных условиях становится малоэффективным, что требует разработки противотеплового костюма.

В связи с тем, что во втором температурном диапазоне допускается применение ПТО как с полной защитой всего тела горноспасателя (костюмы), так и его верхней части (куртки), данный температурный диапазон можно условно назвать переходным.

При работе в куртках существенное значение имеют относительная влажность и скорость движения шахтного воздуха, а также тепловое излучение нагретых стенок горных выработок, поскольку нижняя часть тела и голова горноспасателя не защищены слоем теплоизоляции, и на них не распространяется

охлаждающее воздействие ПТО. В этом плане актуальной является задача при совершенствовании курток распространить охлаждающее воздействие также на голову горноспасателя.

Горноспасательные работы во втором температурном диапазоне могут выполняться в ситуациях, возникших в результате взрыва газа или пыли, эндогенного пожара или в выработках, расположенных на большом удалении от очага пожара.

**Третий диапазон, температура воздуха (61...150) °С.** Этот диапазон следует назвать пожарным, поскольку такие условия в шахте могут возникнуть только при тушении подземного пожара, преимущественно экзогенного. Третий диапазон характеризуется тем, что в таких условиях необходима уже обязательная полная защита всего тела горноспасателя теплоизоляционной одеждой и активное охлаждение всей его поверхности при помощи хладагента (что реализовано, например, в костюмах ТК-60 и ПТК-100). В этом диапазоне выполняются работы, связанные с охлаждением выработок и потоков газов водой или пеной, активным тушением пожаров водой из стволов, разведкой выработок сразу после тушения пожара инертным газом и прочие.

При работе в противотепловой одежде в данном температурном диапазоне относительная влажность шахтного воздуха и скорость его движения для защитных свойств ПТО не имеют существенного значения, поскольку все тело горноспасателя защищено теплоизолирующей, практически герметичной оболочкой. Однако главное значение приобретает воздействие на горноспасателя теплового излучения, интенсивность которого особенно велика при температуре воздуха 100 °С и выше, особенно при близком контакте с очагом пожара.

Наиболее неблагоприятные микроклиматические условия в шахте создаются при тушении развившегося экзогенного пожара. При этом горные выработки нагреваются пожарными газами на большом расстоянии и их температура достигает нескольких сот градусов. После прохождения пожара остается медленно остывающая выработка. Приблизиться к очагу пожара можно только после охлаждения ее водой или пеной. Необходимость быстрых и решительных действий при активном тушении не оставляет времени на радикальное охлаждение выработки. Недостаток воды также не позволяет охладить выработку до температуры, при которой возможно выполнять работы в обычной спецодежде. Быстро и при малом расходе воды стенки выработки могут быть охлаждены до температуры, близкой к 100 °С. Поэтому активное тушение пожара с применением противотепловой одежды будет проходить при температуре от 60 °С до 150 °С. При этом время защитного действия ПТО должно быть достаточным для того, чтобы можно было подойти к пожару и работать около одного часа. При сокращении времени защитного действия ПТО возможно выполнение работы в ней при температуре до 300 °С. Создание противотепловой одежды для работы при более высокой температуре воздуха при применении обычных схем охлаждения и предельно возможной массе в настоящее время технически невозможно. Существующие противотепловые костюмы пожарных для тушения нефтяных и газовых фонтанов в условиях шахты непригодны, так как время их защитного действия при температуре 200 °С около 10 мин, при 1500 °С – до 2

мин, а масса (35...40) кг (в полном снаряжении, с дыхательным аппаратом).

Известно, что эффективность активного тушения пожара, например, водой из стволов со стороны свежей вентиляционной струи, тем выше, чем меньше расстояние от горноспасателя в ПТО до очага пожара. Однако с уменьшением расстояния существенно возрастает поверхностная плотность лучистого теплового потока.

В связи с этим, весьма актуальной является задача определения ее значений в зависимости от расстояния от очага пожара, температуры горения, площади поперечного сечения горной выработки и других факторов с учетом безопасности выполнения работ, а также термостойкости материала оболочки ПТО. По существу задача состоит в определении исходных данных для создания нового, более эффективного противотеплового (противопожарного) костюма и одновременно расширении третьего (пожарного) диапазона повышенной температуры воздуха в ЗПТ. Учитывая термические свойства выпускаемых промышленностью материалов для наружной оболочки ПТО, реально ставить вопрос о создании нового противотеплового костюма для максимальной температуры применения 300 °С.

На основании анализа микроклиматических условий, создающихся в шахте в аварийной ситуации, преимущественно при пожаре, можно сделать вывод, что для обеспечения возможности работы горноспасателей во всех трех рассмотренных температурных диапазонах необходимо создать типоряд противотепловой одежды, состоящий из четырех моделей, а также газотеплозащитный костюм для диапазона (27...40) °С (рис. 3.3).

При разработке теплозащитного костюма наиболее сложным является определение материала наружной оболочки с теплоотражающим покрытием, количество слоев и охлаждающих элементов, которые непосредственно зависят от теплового излучения очага пожара, воздействующего на члена ВГК шахты или горноспасателя при его тушении в начальной стадии его развития или температуры окружающей среды.

В состав комплекса средств индивидуальной противотепловой защиты горнорабочих, противогазотепловой защиты членов ВГК шахты (горноспасателей), включая средство экстренного охлаждения пострадавших при перегревании, а также пожарных подразделений должны входить специальная одежда: (жилеты, куртки, костюмы) и средства для ее применения (аккумуляторы холода, теплоизолирующие контейнеры, сумки для одежды и использованных аккумуляторов холода, морозильные установки).

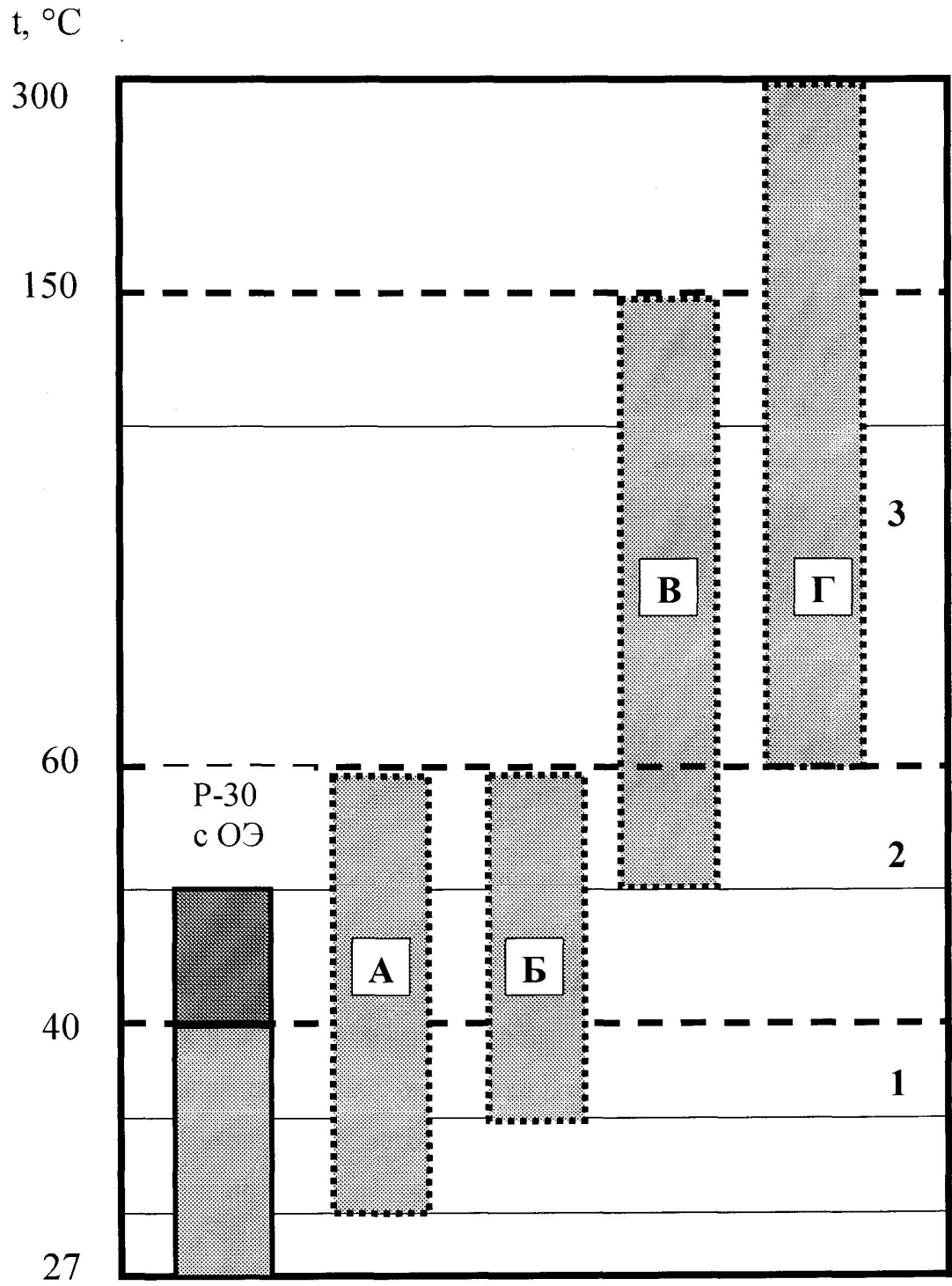


Рис. 3.3. Диапазоны температуры воздуха, создающиеся в экстремальных микроклиматических условиях при аварии в шахте (1-3), и типоряд ПТО, который необходимо разработать (А, Б, В, Г).

Средства должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Газотеплозащитный костюм горноспасателя (члена ВГК шахты) должен быть изолирующим от внешней среды, защищать от одновременного воздействия ядовитых химических веществ с концентрацией, приведенной в табл. 1.1, обеспечивать эффективное и безопасное ведение аварийно-спасательных работ средней тяжести при температуре воздуха до 40 °С, влажности до 100 % в течение 120 мин, а от химических веществ с резервом 60 мин, т.е. 180 мин.

2. Противотепловой костюм горноспасателя (члена ВГК шахты), предназначенный для ведения работ в экстремальных микроклиматических условиях, особенно при тушении пожаров в начальной стадии их развития первичными средствами, должен обеспечивать их защиту при воздействии теплового лучистого потока или температуры окружающей среды до 100 °С не менее 60 минут.

3. Противотепловая куртка должна обеспечивать защиту туловища и головы в диапазоне температур воздуха (27...60) °С и влажности до 100 % с временем защитного действия выше, чем куртки ТК-40, с физиологическими параметрами, не превышающие допустимых медицинских норм.

4. Противотепловые костюмы для пожарных подразделений должны обеспечивать защиту в диапазоне температур воздуха окружающей среды (100...150) °С не менее, чем для костюмов горноспасателей (членов ВГК) аналогичного назначения.

5. Противотепловой жилет горнорабочих должен обеспечивать выполнение работ различной тяжести в течение рабочей смены, причем при одном оснащении ОЭ-2 при работе со средней нагрузкой не менее 120 мин с физиологическими параметрами, не превышающие допустимых медицинских норм.

6. Костюм экстренного охлаждения пострадавших при перегревании организма и механических травмах должен обеспечивать изоляцию человека от внешней среды, минимальное время восстановления физиологических параметров и работоспособности, иметь быстроразъемные составные части для охлаждения отдельных участков тела при механических травмах.

7. Теплоизолирующий контейнер должен обеспечивать вместимость водоледяных аккумуляторов холода (АХ) в количестве, необходимом для переоснащения жилета горнорабочих в течение рабочей смены при температуре окружающей среды до 40 °С и влажности до 100 %.

8. Для защитной одежды и выноса из горных выработок шахты использованных АХ должны быть предусмотрены сумки.

9. Морозильная установка должна обеспечивать замораживание АХ в сумки в количестве, необходимом для работы горнорабочих в жилетах в течение рабочей смены или оснащения курток, костюмов горноспасателей (членов ВГК) и пожарных.

10. Для эффективного охлаждения тела горнорабочих, членов ВГК водоледяными АХ и оперативной готовности последних к выполнению аварийно-спасательных работ необходимо максимально обеспечить пропорциональность размещения АХ в соответствии с теплосъемом различных участков тела, а также использовать минимальное их количество для снаряжения и переоснащения защитной одежды.

11. Средства должны иметь минимально возможную массу, простое конструктивное решение, высокую оперативность в использовании, обладать удобством в эксплуатации, легко поддаваться чистке, стирке, дезинфекции и сушке.

Учитывая это, разработаны схемы средств противогазотепловой защиты членов ВГК и горнорабочих, которые приведены на рис. 3.4-3.7.

Газотеплозащитный костюм (см. рис. 3.4) включает следующие основные части: наружную изолирующую оболочку (НИО), охлаждающий костюм (ОК) и респиратор.

НИО предназначена для защиты члена ВГК от воздействия на кожу вредных веществ и представляет собой герметичный двухслойный комбинезон из газонепроницаемого материала, выполненный совместно со шлемом и сапогами, то есть полностью изолирует человека от окружающей среды.

ОК предназначен для поглощения теплоты, выделяемой человеком при выполнении физической нагрузки и проникающей из окружающей среды в подкостюмное пространство.

Респиратор предназначен для обеспечения дыхания и защиты органов дыхания от воздействия вредных веществ. В данном случае для заполнения межслойного пространства комбинезона и продувки слоев используется баллон со сжатым воздухом, избыток которого регулируется клапаном. Возможно, применение воздушных респираторов с ХП-И или с химически связанным кислородом со сроком действия не менее 120 минут.

Под НИО на человека надевается следующее снаряжение: ОК, включающий куртку, брюки и капюшон, снаряжаемые охлаждающими элементами ОЭ-2, которые размещаются во внутренних решетчатых полиэтиленовых карманах; респиратор с маской, манометром и трубкой для отвода кислорода из избыточного клапана; аккумулятор светильника с фарой; аппарат переговорной связи с управляемой кнопкой и антенной (на рисунке не показаны); бурки.

Противотепловой жилет горнорабочих (см. рис. 3.5) с застежками представляет собой трехслойную конструкцию, выполненную из следующих слоев: первый наружный – из воздухонепроницаемой ткани, второй – из объемного теплоизолирующего материала, третий – из прочной комбинированной ткани.

Кроме первого слоя, остальные слои скреплены вместе, на последнем (внутреннем) – пришиты решетчатые полиэтиленовые карманы для ОЭ-2, а пояс стягивается эластичной лентой.

Для температур окружающей среды (27...60) °С предполагается использование куртки 1 с капюшоном 2, которая обеспечивает охлаждения головы, в отличие от куртки ТК-40, и туловища (см. рис. 3.6). Охлаждающие элементы, как и в остальной ПТО, располагаются в пластмассовых решетчатых карманах с максимальным их количеством на туловище и двумя под капюшоном, т.к. при использовании горноспасателями стандартной шахтерской каски разместить их с выбранными выше параметрами в плане невозможно. Размещение ОЭ-2 на передней нижней части куртки под углом, как и в жилете, выбрано с точки зрения удобства горноспасателей при наклонах вперед и сидении в режиме отдыха.



Отсутствие охлаждения нижней части тела и рук горноспасателя в куртке (рукава изготавливаются из плотного материала и используют брюки от шахтерской спецодежды) обеспечивают, как следует из технической характеристики куртки ТК-40, при температуре окружающей среды от 40 до 60 °С и влажности (85...100) % небольшой срок защитного действия, поэтому для значительного его увеличения при работе в этом диапазоне предлагается использование относительно легкого костюма со схемой охлаждения всех участков тела, так же как и в газозащитном костюме.

Отличительной особенностью схемы охлаждения головы в костюме (см. рис. 3.7) является возможность использования большего количества ОЭ-2 за счет разработанной специальной каски, позволяющей расположить их от пяти до семи штук, в том числе половинчатых. Такая же схема размещения охлаждающих элементов вокруг головы использована в дальнейшем и в костюмах для горноспасателей при работе с температурами окружающей среды от 60 до 300 °С.

Охлаждение рук предполагается осуществить размещением ОЭ-2 в каждом рукаве на плечевой части руки и на предплечье.

Фиксация ОЭ-2 на брюках ниже пояса препятствует движению ног в тазобедренном суставе, поэтому предложено на бедрах ОЭ-2 подвесить на поясе в виде лепестков короткой юбочки, а на нижней части бедра их крепить на отдельных панелях, также подвешенных к поясу и пристегнутых к поясу,

В костюме, предназначенном для работы при температуре окружающей среды от 60 до 150 °С такого охлаждения явно недостаточно, т.к. необходимо, как и в костюме ПТК-100, снятие теплоты с кистей рук и стоп ног, в связи с этим, в данном случае, кроме вышеприведенной схемы охлаждения для предыдущих костюмов, предусмотрено дополнительное охлаждение этих участков тела горноспасателя, схема системы охлаждения которых приведена на рис. 3.7.

Идея охлаждения кистей рук и стоп ног заключается в использовании небольшого количества воды, которая при движении рук и ног контактирует с водоледяными охлаждающими элементами, а затем при поступлении ее к этим участкам тела горноспасателя, в конечном счете, периодически охлаждает их.

Для охлаждения кистей рук (см. рис. 3.7) используется водонепроницаемый рукав, надеваемый с соответствующим креплением на руки, внутри которого находятся ОЭ-2 и небольшое количество воды в резиновой перчатке 2. Вода при движении руки вверх охлаждается за счет контакта с ОЭ-2, а при опускании – поступает в перчатку, охлаждая кисть.

Для охлаждения ступней ног предложена водоледяная система с маятниковым движением воды, принцип работы которой заключается в следующем. На нижней части бедра один из ОЭ-2 заменяется на специальный охлаждающий элемент: карман из прорезиненной ткани с заправочной горловиной и штуцером для подсоединения трубки (поливинилхлоридной) в нижней части к стельке, выполненной в виде плоской ампулы из прорезиненной ткани.

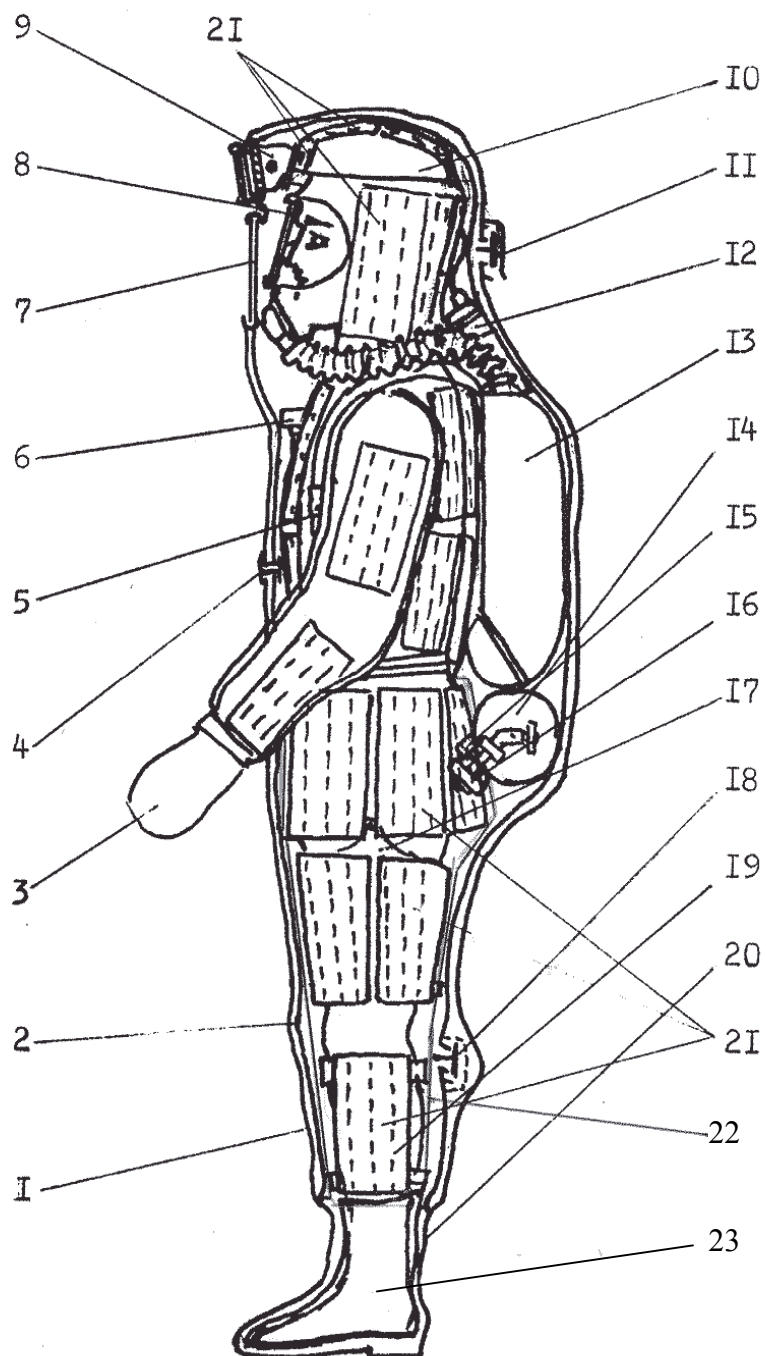
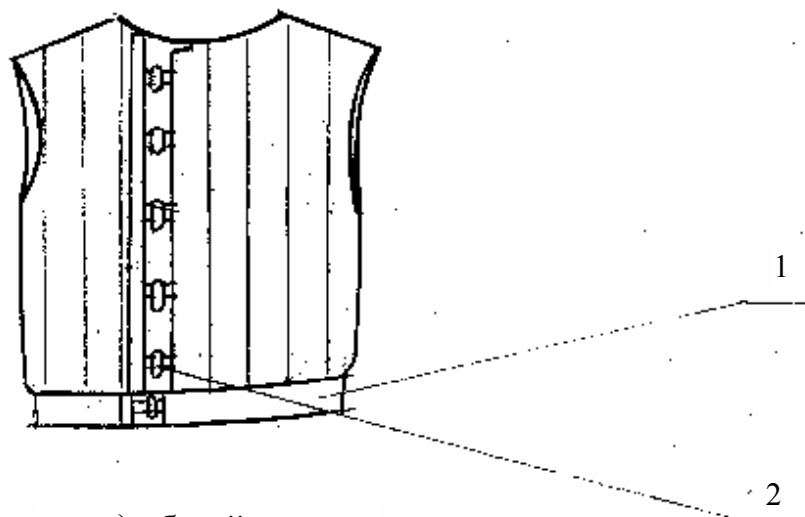
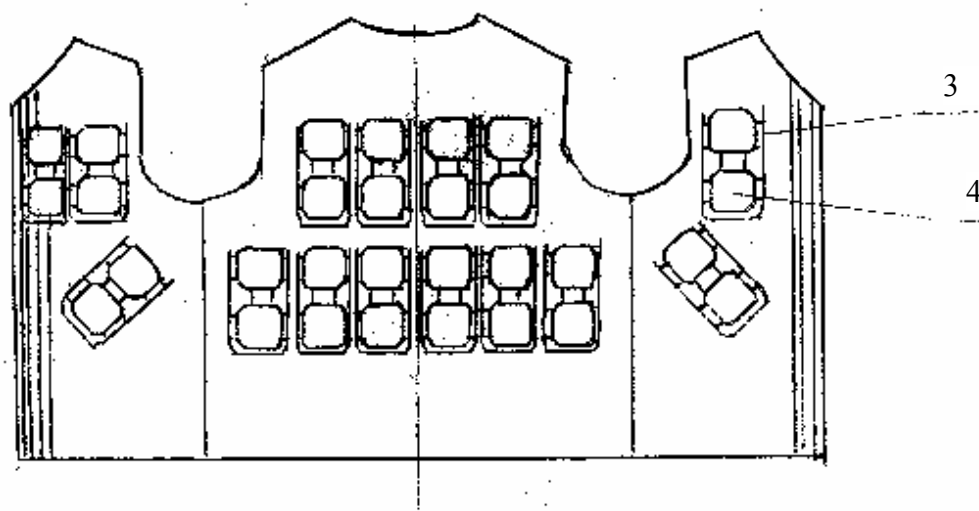


Рис. 3.4. Схема газотеплозащитного костюма:

1 – наружная оболочка; 2 – внутренняя оболочка; 3 – рукавицы; 4 – штуцер подачи воздуха в подкостюмное пространство; 5 – куртка; 6 – манометр респиратора; 7 – иллюминатор костюма; 8 – маска панорамная; 9 – фара светильника; 10 – охлаждающий колпак с каской; 11 – клапан продувки наружной оболочки; 12 – аккумулятор; 13 – респиратор; 14 – баллон со сжатым воздухом; 15 – манометр; 16 – редуктор с дросселем; 17 – пояс охлаждающий; 18 – клапан продувки внутренней оболочки; 19 – холодильники икроножные; 20 – сапоги; 21 – элементы охлаждающие водолеянные ОЭ-2; 22 – брюки; 23 – бурки



а) общий вид



б) Внутренняя сторона жилета с ОЭ-2

Рис. 3.5. Схема противотеплового жилета:  
 1—пояс; 2—застежка; 3—решетчатый полиэтиленовый  
 карман; 4—водоледающий охлаждающий элемент (ОЭ-2)

Вода в кармане замораживается в морозильной установке или снаряжается льдом из ОЭ-2, а стелька заполняется водой. При контакте ноги горноспасателя с почвой возникает давление в стельке, которое вытесняет из нее воду по трубке в охлаждающий карман, контактируя с находящимся там льдом, и охла-

ждается. При отрыве ноги от почвы под действием гравитационной силы вода поступает обратно в стельку и охлаждает стопу.

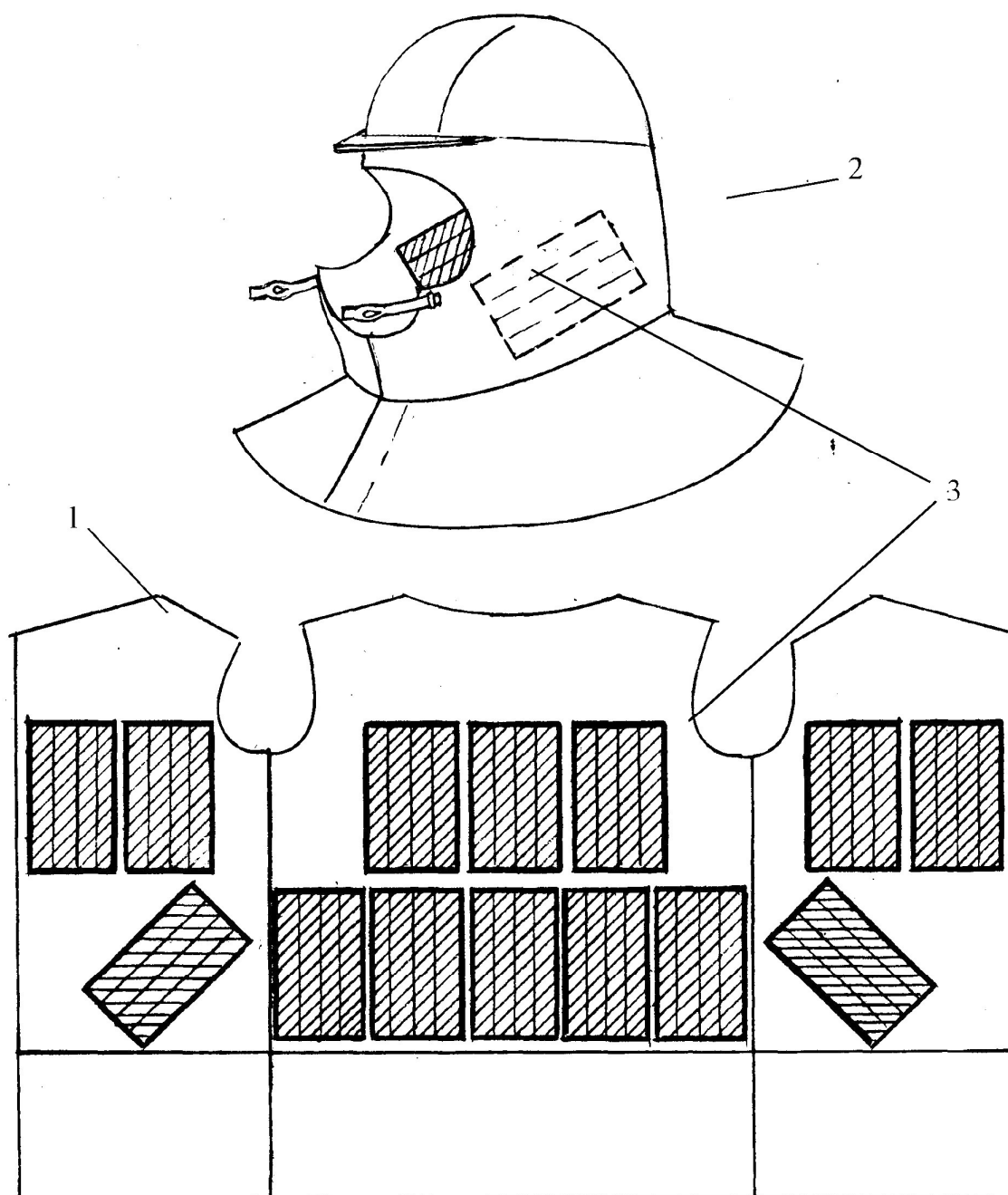


Рис. 3.6. Схема охлаждения куртки (1) с капюшоном (2) и ОЭ-2 (3) в решетчатых карманах для защиты горноспасателей от температуры окружающей среды

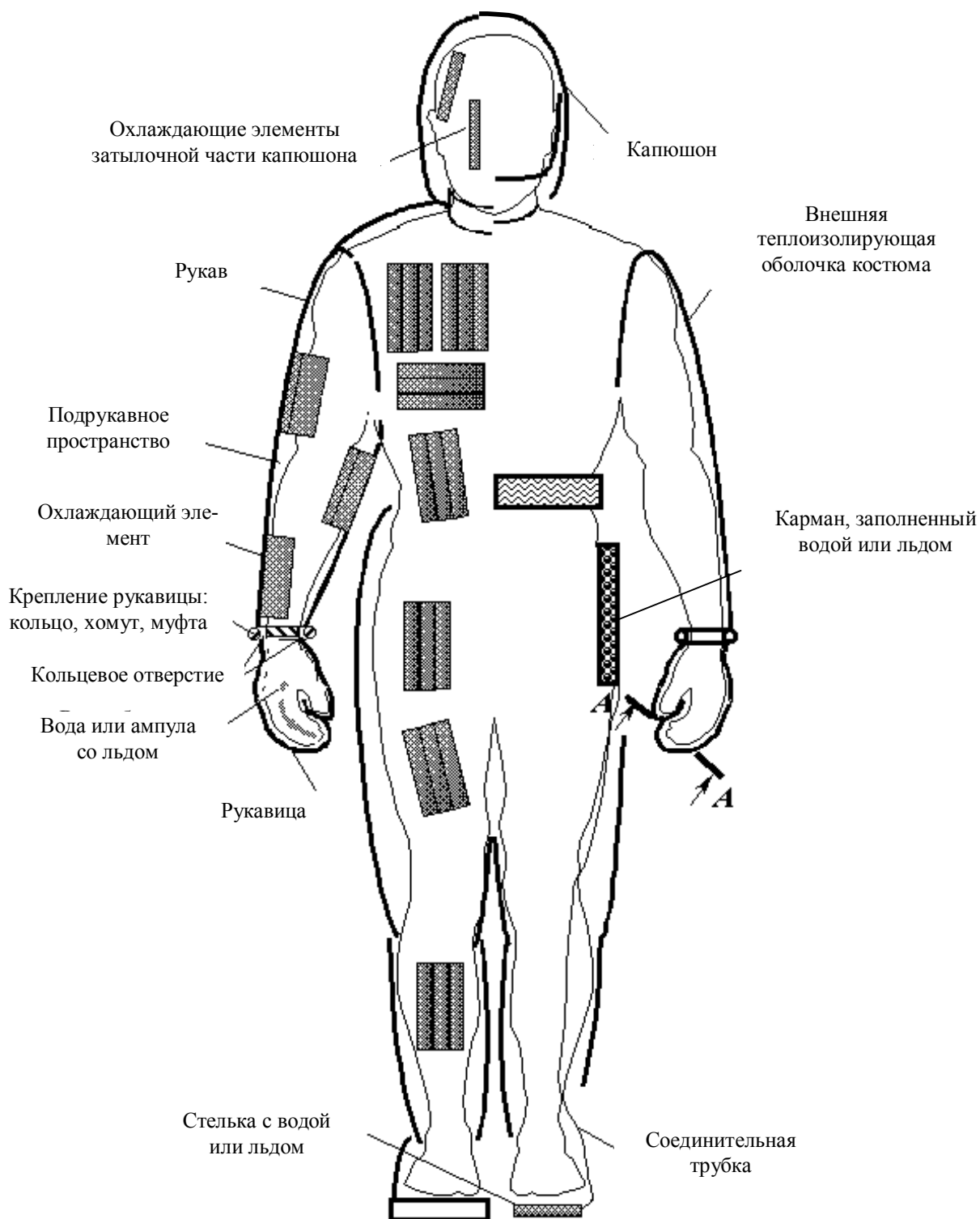


Рис. 3.7 . Общая схема системы охлаждения в изолирующей одежде

Для эффективного охлаждения стоп горноспасателя необходимо, с одной стороны, чтобы вся вода, находящаяся в стельке, поступала в охлаждающий карман, а с другой, она должна заполнить объем стельки в период времени отрыва ноги от почвы.

Отличительной особенностью противотеплового костюма члена ВГК, предназначенного для тушения пожаров в начальной стадии их развития, по сравнению с газотеплозащитным костюмом является использование наружной оболочки в виде однослойного комбинезона, выполненного из термостойкого теплоотражательного материала, расположение ОЭ-2 под стопами ног с их изоляцией и непосредственно в наружной поверхности рукавиц.

Капюшон и комбинезон выполнены из трех слоев: наружный – прорезиненной ткани, средней – полотна объемного теплоизолирующего, внутренний – комбинированной ткани, по поверхности которой расположены решетчатые полиэтиленовые карманы для размещения замороженных ОЭ-2.

В костюмах горноспасателей (членов ВГК), предназначенных для тушения пожара при воздействии температуры окружающей среды 300 °С, предусмотрены системы охлаждения, аналогичные тем, которые принимаются для предыдущих костюмов и выбираются в зависимости от времени ликвидации пожаров в различных стадиях их развития. При этом наружная оболочка костюма изготавливается из более термостойкого материала с высокой отражательной способностью при воздействии лучистого теплового потока.

При разработке таких костюмов наиболее сложным является выбор материала, особенно для наружной оболочки с теплоотражающим покрытием, определение количества слоев и системы охлаждения, которые непосредственно зависят, в основном, от лучистого потока, действующего на человека при тушении пожара в горной выработке шахты со стороны поступающей вентиляционной струи.

Из-за многообразия видов горючих материалов, которые могут находиться в выработке (древесина, конвейерная лента, смазочные материалы, резиноканальные трубопроводы, электрические и силовые кабели, уголь и др.), пожары в шахтах существенно различаются по развиваемой тепловой мощности, скорости и дальности распространения, размерам зон шахтной вентиляционной сети, опасных по тепловому фактору.

В связи с существенной неоднородностью объемной структуры очага пожара, различным расположением и удаленностью окружающих его стенок выработок, крепи, корпусов машин и механизмов, одежды и открытых участков тела людей, лучистый тепловой поток распределяется на них крайне неравномерно. При этом очевидно наличие максимальных его значений в каждом из координатных направлений пространства для различной элементарной площади облучаемой поверхности.

Поэтому в дальнейшем для обеспечения гарантии прогноза температурных условий в районе очага пожара математическое моделирование результатов воздействия его тепловой энергии на различные объекты проведено исходя из наихудших из возможных, с точки зрения безопасности для человека, условий [6,7].

Предположим (рис. 3.8), что  $dV(x, y, z)$ ,  $\text{м}^3$  – элементарный объем поглощающей и рассеивающей газовой среды в области очага пожара, его температура  $T$ , К, и размер  $l$ , м.

Рассмотрим лучистый теплообмен между объектом среды  $dV$  и окружающей его сферической оболочкой. Считаем оболочку абсолютно черной.

Согласно закону Кирхгофа сферическое излучение рассматриваемого объема поглощающей сферы в данной области спектра равно количеству энергии, которое поглощает этот объем из излучения окружающей оболочкой в этой же области спектра. Таким образом, вместо непосредственного расчета излучения объема  $dV$ , достаточно определить долю энергии, поглощаемой этим объемом из излучения окружающей оболочки.

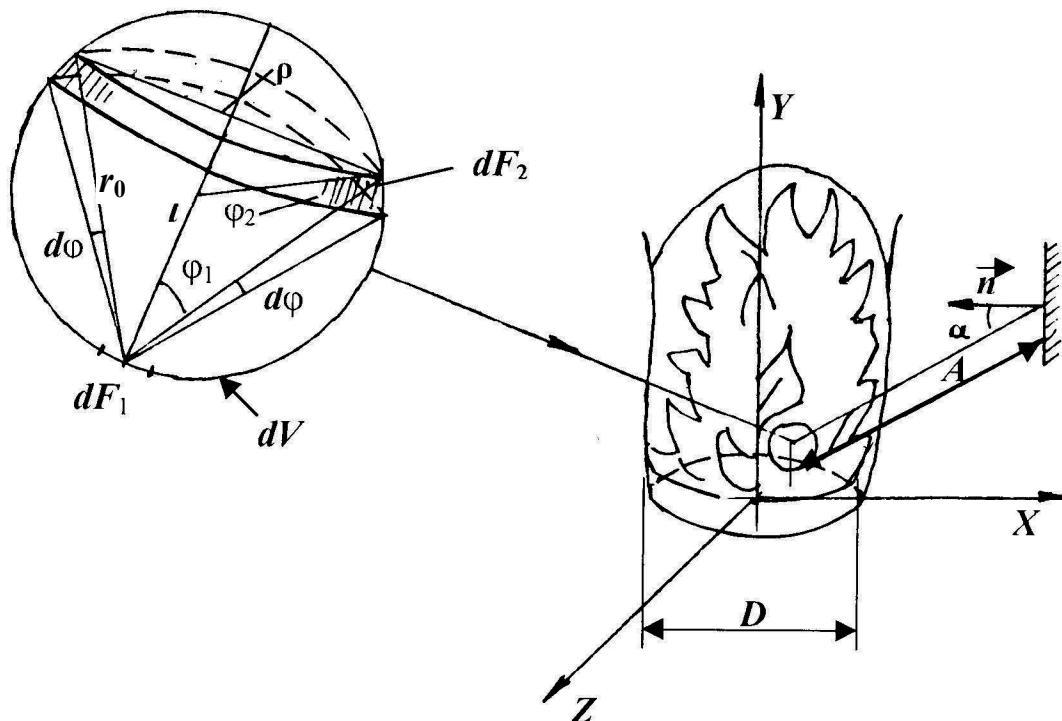


Рис. 3.8. Модель теплового излучения очага пожара

Определим излучение  $d\Phi$  элементарного кольцевого пояса  $dF_2$  сферической оболочки на элемент поверхности  $dF_1$  через шаровой поглощающий слой. Вначале считаем среду не поглощающей. Тогда

$$d\Phi = q_0 \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r_0^2} dF_1 dF_2, \quad (3.5)$$

где  $q_0$  – плотность потока энергии полного полусферического излучения абсолютно черного тела при температуре  $T$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$\varphi_1, \varphi_2$  – углы, под которыми видны поверхности, рад.  
Площадь элементарного кольцевого потока

$$dF_2 = 2\pi\rho_1 \frac{r_0^2 d\varphi}{\cos\varphi_2},$$

где  $\rho_1 = r_0 \sin \varphi_1$ .

Для сферы при  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$

$$d\Phi = 2q_0 \cos \varphi \sin \varphi d\varphi dF_1. \quad (3.6)$$

Так как среда поглощающая, то для области спектра, в которой она обладает полосами поглощения,

$$d\Phi = 2q \cos \varphi \sin \varphi d\varphi dF_1,$$

где  $q$  – плотность потока энергии полного полусферического излучения абсолютно черного тела в заданной области спектра, Вт/м<sup>2</sup>.

Согласно закону Бугера энергия  $\Phi_{\pi}$ , поглощаемая средой из излучения элементарной поверхности  $dF_2$ , равна

$$d(d\Phi_{\pi}) = (1 - e^{-\kappa r_0}) d\Phi = 2q(1 - e^{-\kappa r_0}) \cos \varphi \sin \varphi d\varphi dF_1.$$

Ввиду малости значения  $\kappa r_0$  пренебрегаем членами второго и более высокого порядка после разложения экспоненциальной функции в ряд

$$d(d\Phi_{\pi}) = 2q\kappa l \cos^2 \varphi \sin \varphi d\varphi dF_1, \quad (3.7)$$

Для определения энергии, поглощенной средой из излучения, которое посылает сферическая оболочка на элемент  $dF_1$ , интегрируем последнее выражение по  $\varphi$  от 0 до  $\pi/2$ . Тогда

$$d\Phi_{\pi} = -2q\kappa l dF_1 \int_0^{\pi/2} \cos^2 \varphi d(\cos \varphi) = \frac{2}{3} q\kappa l dF. \quad (3.8)$$

Такое же количество энергии, согласно закону Кирхгофа, в указанной области спектра будет излучать сам сферический поглощающий объем на элемент поверхности  $dF_1$ . В результате сферическое излучение  $d\Phi_{\pi}$  рассматриваемого объема поглощающей среды в заданном интервале длин волн будет равно



$$d\Phi_{\text{и}} = d\Phi_{\text{п}} = \frac{2}{3} q \kappa l dF. \quad (3.9)$$

С учетом закона Стефана-Больцмана

$$d\Phi_{\text{и}} = \frac{2}{3} \sigma T^4 \kappa l dF, \quad (3.10)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-11}$  кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  
 $T$  – температура очага пожара.

Полное сферическое излучение объема  $dV$  получим, интегрируя выражение (3.9) поверхности оболочки этого объема, с учетом величины  $\varepsilon = \kappa l$ , представляющую собой оптическую плотность поглощающей среды или поглотельную способность (степень черноты)

$$d\Phi_{\text{и}} = \frac{2}{3} \sigma T^4 \kappa l \pi l^2 = 4 \kappa \sigma T^4 \frac{\pi l^3}{6}. \quad (3.11)$$

Величина  $\pi l^3 / 6$  представляет собой объем элементарной сферической оболочки  $dV$ .

Обозначим  $A$  – расстояние от элементарного объема  $dV$  до произвольно ориентированной площадки с нормалью  $\bar{n}$  (см. рис. 3.8), м;  $\alpha$  – угол между направлением нормали и прямой, соединяющей центры излучающей сферы и поглощающей площадки, рад. Тогда отношение интенсивностей тепловых потоков через сферу  $dV$  и сферу радиусом  $A$  будет обратно пропорционально отношению площадей сфер радиусом  $l/2$  и  $A$ , т.е. интенсивность теплового потока  $q_A$  через сферу радиусом  $A$  с учетом закона Ламберта равна

$$q_A = \frac{\Phi_{\text{и}}}{4\pi A^2} = \frac{1}{4\pi A^2} \kappa \sigma T^4 \cos \alpha dV = \frac{1}{6} \kappa \sigma T^4 \frac{l^3}{A^2} \cos \alpha. \quad (3.12)$$

Величина

$$\kappa_0 = \frac{\kappa \cos \alpha}{4\pi A^2} \quad (3.13)$$

называется коэффициентом облучения, с помощью которого можно учесть расположение объектов в пространстве по отношению к излучаемой поверхности.

Выражение (3.12) позволяет по известному закону пространственного распределения и коэффициентов ослабления в факеле пламени рассчитать плотность падающих лучистых потоков через поверхности различной ориентации. Полное излучение факела в произвольную точку пространства складывается из излучений всех элементарных объемов.

Анализ экспериментальных данных и моделирование на ЭВМ лучистого потока с использованием формулы (3.12) показывает, что максимальная плотность падающих на объект лучистых потоков  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, от локального очага пожара (а именно такие пожары тушат активным способом) является функцией степенной зависимости от расстояния  $x$  между человеком и центром очага

$$q = a\sigma T_{\text{эф}}^4 \left( \frac{x}{D} \right)^{-b}, \quad (3.14)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические константы;

$T_{\text{эф}}$  – значение температуры в очаге, К.

Значение  $T_{\text{эф}}$  зависит от коэффициента ослабления  $\kappa$ , диаметра  $D$  очага пожара и максимальной температуры в очаге  $T_{\Gamma}$ , К.

Величина  $\kappa$  при  $T_{\Gamma} > 773$  К определяется по формуле

$$\kappa = 1,6 \cdot 10^{-3} T_{\Gamma} - 0,5.$$

В качестве диаметра очага пожара  $D$  (в сторону завышения) принимаем диаметр круга, площадь которого равна площади сечения выработки  $S$ , т.е.

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 1,13\sqrt{S}. \quad (3.15)$$

Значения  $a$ ,  $b$  и  $T_{\text{эф}}$  зависят от произведения (числа Бугера)

$$B_U = \kappa D.$$

Так, для горных выработок, у которых  $3 \text{ м}^2 \leq S \leq 10 \text{ м}^2$ ,

$$3,3 \leq B_U \leq 6,0. \quad (3.16)$$

В этом диапазоне чисел  $B_U$  следует согласно принимать

$$T_{\text{эф}} = 0,905 T_{\Gamma}. \quad (3.17)$$

Для выработок большого сечения ( $S > 10 \text{ м}^2$ )  $T_{\text{эф}} = 1370$  К.

В диапазоне неравенства (3.16) среднее значение  $a = 0,16$  и  $b = 2,00$ . Учитывая, что  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), и подставляя выражения (3.15), (3.17) в

уравнение (3.14), получим заведомо завышенное значение  $q$ , кВт/м<sup>2</sup>, что является определенным резервом безопасности для человека:

$$q = 0,78 \cdot 10^{-11} T_{\Gamma}^4 \frac{S}{x^2}. \quad (3.18)$$

В частности, при горении конвейерной ленты

$$q = 27,7S/x^2.$$

Согласно ранее проведенным исследованиям при  $q = 0,67$  кВт/м<sup>2</sup> эффект действия теплового излучения аналогичен действию солнечного излучения на широте Великобритании летом;  $q = 1$  кВт/м<sup>2</sup> – максимальное значение при неопределенно долгом воздействии на кожу человека; при  $q = 6,4$  кВт/м<sup>2</sup> – спустя 8 с после начала воздействия на кожу, т.е. необходимо применять защитные средства.

Примем  $q_{\text{кр}} = 1$  кВт/м<sup>2</sup> в качестве допустимого (критического) значения  $q$ . Тогда по формуле (3.14) определим допустимое расстояние  $x_{\text{кр}}$ , м, на которое можно приблизиться к границе очага пожара без защитных средств:

$$x_{\text{кр}} = x - \frac{D}{2} = (0,28 \cdot 10^{-5} T_{\Gamma}^2 - 0,564) \sqrt{S}. \quad (3.19)$$

При горении конвейерной ленты  $x_{\text{кр}} = 4,71\sqrt{S}$ .

Так, если  $S = 7$  м<sup>2</sup>, имеем  $x_{\text{кр}} = 12,5$  м. Первичные средства тушения эффективны при расстоянии до очага пожара не более 5 м. Поэтому необходимо использовать средства противотепловой защиты, так как при расстоянии  $x_{\text{кр}} = 5$  м из формулы (3.12) следует, что  $q = 7,7$  кВт/м<sup>2</sup>, а противотепловое средство должно воспринимать, рассеивать и отражать лучистый поток  $q = 6,7$  кВт/м<sup>2</sup>.

На основе выражений (3.18), (3.19) построена номограмма (рис. 3.9) для определения лучистого потока в зависимости от температуры горения деревянной крепи ( $T_{\Gamma} = 1273$  К), конвейерной ленты ( $T_{\Gamma} = 1373$  К) и угля ( $T_{\Gamma} = 1473$  К), площади поперечного сечения выработки и расстояния до очага пожара, а также зависимость для определения критического расстояния (рис. 3.10) от вышеуказанных горящих материалов и площади поперечного сечения выработки.

Анализ приведенных результатов теоретических исследований показывает, что критические расстояния превышают расстояние 5 м для эффективного тушения пожаров первичными средствами, а максимальный лучистый поток (см. рис. 3.9) на этом расстоянии в зависимости от горящих материалов равен от 3 до 25 кВт/м при площади  $S$ , равной от 4 до 16 м<sup>2</sup>.

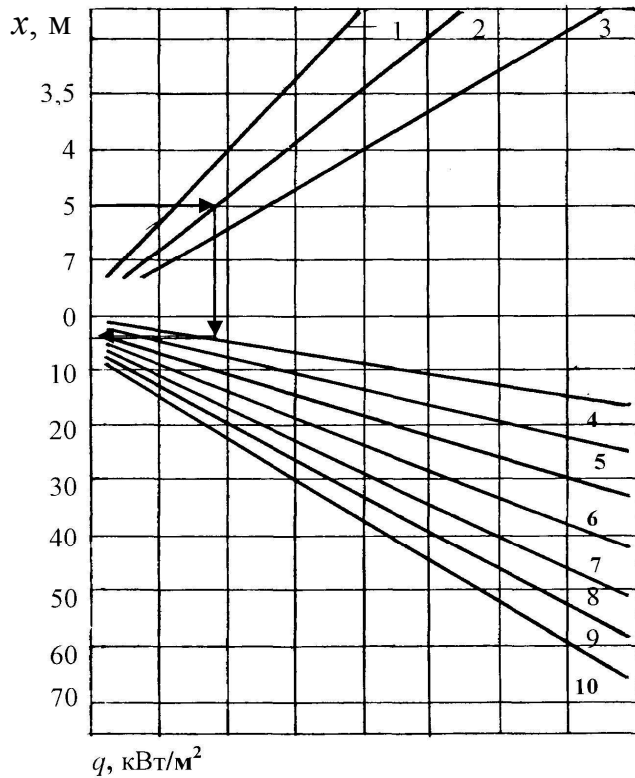


Рис. 3.9. Номограмма для определения лучистого потока  $q$  в зависимости от расстояния ( $x$ ) до очага пожара, горящих материалов и сечения ( $S$ ) выработки:  
 1 – деревянная крепь;  
 2 – конвейерная лента;  
 3 – уголь; 4... 10 – площади сечения выработки соответственно 4-16 м с шагом 2 м<sup>2</sup>

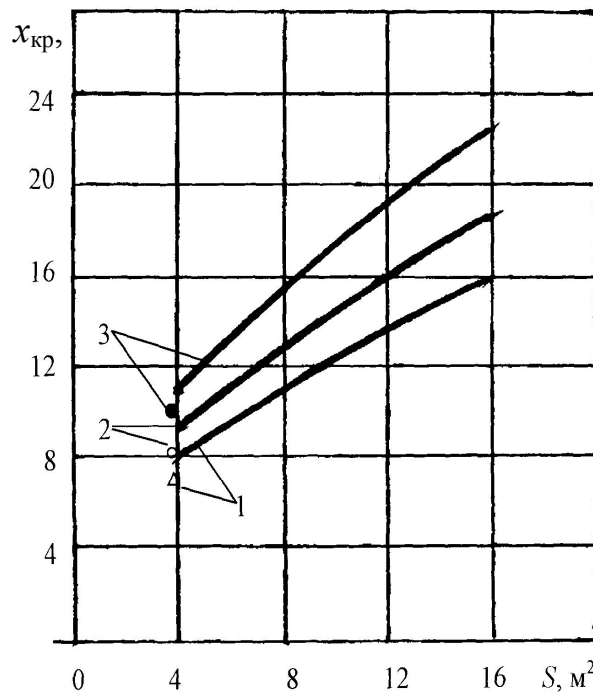


Рис. 3.10. Зависимость критического расстояния до очага пожара от сечения выработки при горении деревянной крепи (1), конвейерной ленты (2) и угля (3):

— результаты теоретических исследований

Δ, ○, ● — данные эксперимента

Зависимости (3.18), (3.19) могут быть использованы для оценки количества лучистого теплового потока, который должен быть отражен, рассеян или

поглощен противотепловым костюмом. Однако они получены на основании экспериментальных данных для локальных очагов пожара в начальной стадии их развития, которые могут быть потушены членами ВГК шахты. На практике чаще приходится ликвидировать пожары на стадии их полного развития.

В результате обработки ранее полученных данных с учетом шахтных условий, оказалось, что значения коэффициента облученности для развившихся пожаров пропорциональны отношению  $\sqrt{S}/x$  и значительно превышают значения, рассчитанные по формуле (3.13).

В данном случае предполагается, что воздействие на костюм при тушении пожара горноспасателем (членом ВГК шахты) осуществляется за счет лучистого теплообмена от источника горения, которым является все сечение выработки. При этом не учитывается влияние на теплообмен угольной пыли в воздушной среде.

Расчет производится следующим образом.

Определяется излучаемая мощность очага пожара (кВт/м<sup>2</sup>):

$$q = \varepsilon \sigma T^4, \quad (3.20)$$

находится безразмерный параметр расстояния

$$\bar{x} = x / \sqrt{S}, \quad (3.21)$$

используя который с помощью графика (рис. 3.11), устанавливается коэффициент облучения  $\kappa_0$  противотеплового костюма.

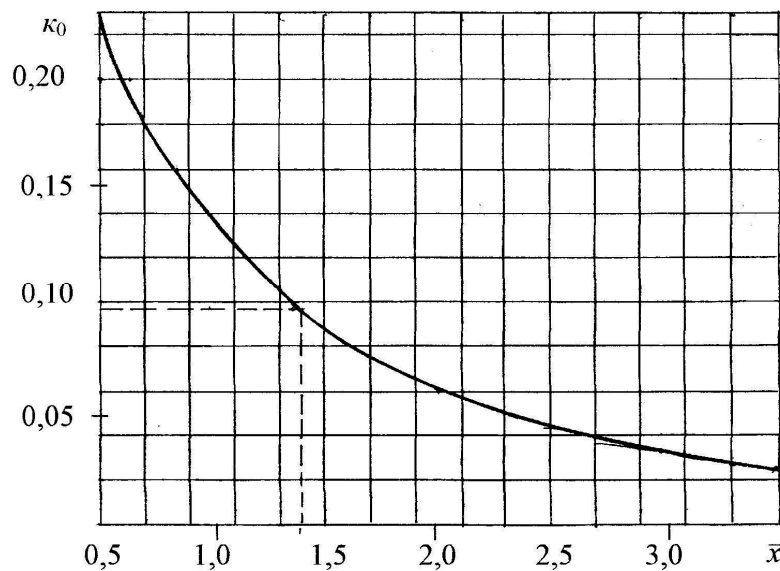


Рис 3.11. Зависимость коэффициента облученности  $\kappa_0$  противотеплового костюма от относительного расстояния  $\bar{x} = x / \sqrt{S}$

Затем находится интенсивность ( $q_{\Pi}$ , кВт/м<sup>2</sup>) падающего лучистого потока на единицу площади поверхности костюма



И, наконец, костюм экстренного охлаждения пострадавших при перегревании и механических травмах (рис. 3.12) состоит из капюшона и комбинезона. Капюшон предназначен для защиты от проникновения внешнего тепла к голове и шее, для закрепления ОЭ-2 в местах расположения термочувствительных зон на шее пострадавшего, комбинезон – для охлаждения туловища, конечностей и размещения ОЭ-2 в местах обеспечивающих эффективное снижение его теплового напряжения организма.

Комбинезон, рукава, рукавицы, штанины снабжены поперечными кулисами с протянутой в них тесьмой, позволяющей плотно стянуть соответствующие части комбинезона, прижимая источники холода к телу пострадавшего. Рукава и штанины выполнены съемными и крепятся к корпоральной части с помощью текстильных застежек, что позволяет, при необходимости, отделять и использовать элементы костюма, для охлаждения отдельных частей тела при механических травмах. Отличительной особенностью противотеплового костюма члена ВГК, предназначенного для тушения пожаров в начальной стадии их развития (рисунок не приведен), по сравнению с газотеплозащитным костюмом является использование наружной оболочки в виде однослойного комбинезона, выполненного из термостойкого теплоотражательного материала, расположение ОЭ-2 под стопами ног с их изоляцией и непосредственно в наружной поверхности рукавиц.

Капюшон и комбинезон выполнены из трех слоев: наружный – прорезиненной ткани, средней – полотна объемного теплоизолирующего, внутренний – комбинированной ткани, по внутренней поверхности которой расположены решетчатые полиэтиленовые карманы для размещения замороженных ОЭ-2. Основным элементом системы охлаждения для всей одежды являлся водоледающей охлаждающий элемент ОЭ-2 (рис. 3.13).

Расчет параметров системы охлаждения, в том числе определение количества водоледающих охлаждающих элементов в зависимости от времени защитного действия, для куртки и костюмов при использовании ОЭ-2 выполняются на основании исследований теплофизических процессов в этих системах. Ниже приведем теоретические исследования для определения параметров системы охлаждения кистей рук и стоп ног, в результате чего должно выполняться условие, чтобы время их защитного действия было не меньше, чем для основной части ПТО.

Теплоизоляция тыльной стороны кисти руки не вызывает проблем и может быть выполненной равноценно теплоизоляции прочих частей теплоизолирующей оболочки ПТО. Кисти рук составляют около 4 % площади поверхности тела человека и, следовательно, для их охлаждения требуется такая же доля мощности системы охлаждения ПТО. Кисть охлаждается водой, находящейся в резиновой перчатке и периодически переливаемой в рукав с ледяными охлаждающими элементами при поднятии кисти выше локтя, в результате расчета необходимо определить периодичность движений рук горноспасателя, а также количество (массу) водоледающих элементов (льда), необходимого для охлаждения кистей в течение времени защитного действия ПТО.

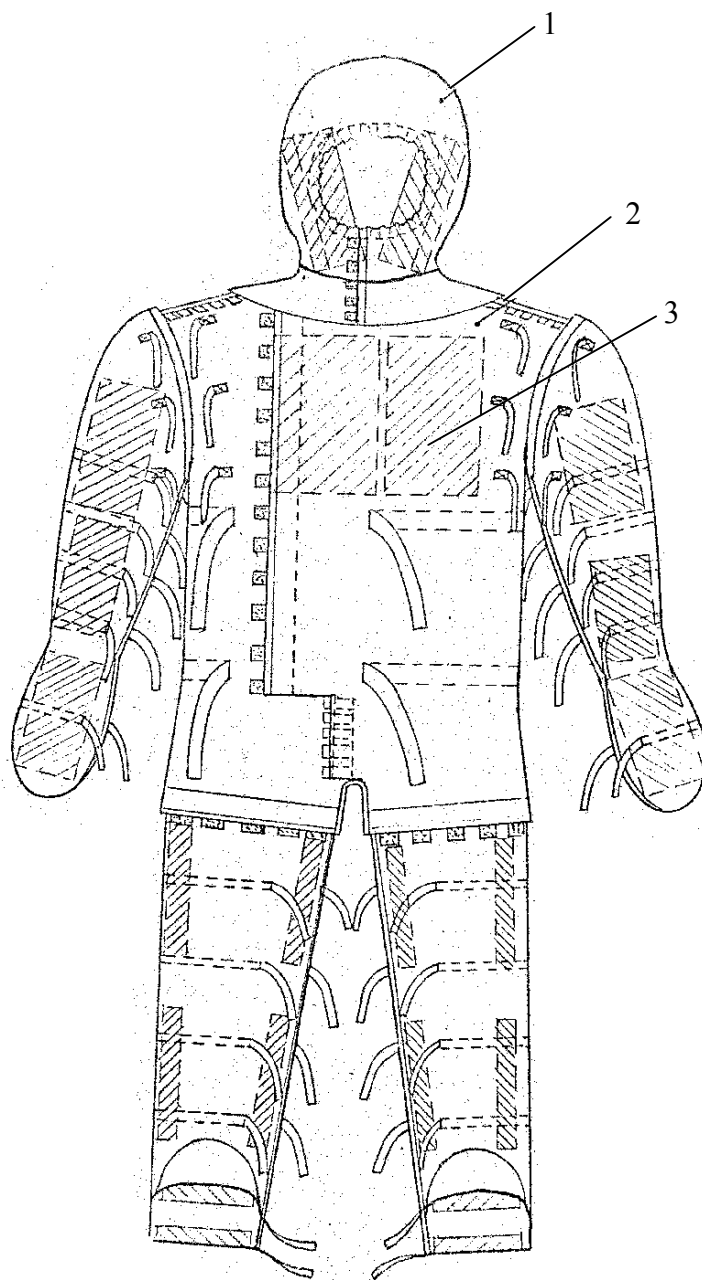


Рис. 3.12. Схема костюма экстренного охлаждения пострадавших при перегревании:  
1 – капюшон; 2 – комбинезон;  
3 – водоледающей охлаждающий элемент ОЭ-2



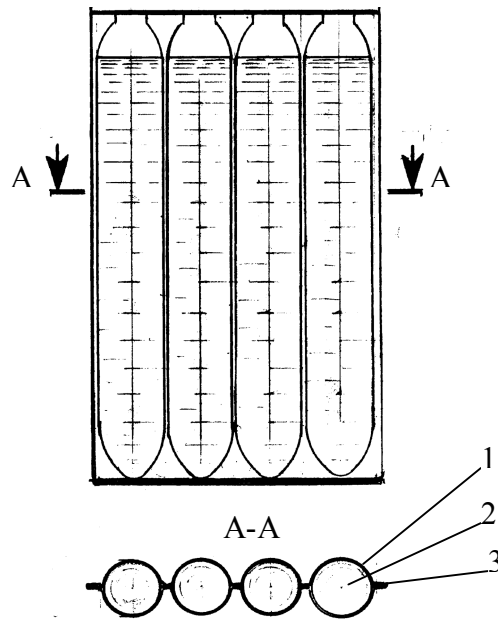


Рис. 3.13. Водоледающий охлаждающий элемент (ОЭ-2):  
1 – полиэтиленовая пленка; 2 – вода (лед); 3 – шов

Конструктивные и эксплуатационные параметры вышеприведенных средств индивидуальной противогазотепловой защиты горнорабочих и членов ВГК шахты могут быть определены на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, которые приведены ниже.

Время защитного действия костюма при воздействии одного  $\tau_k$ , с, или нескольких  $\tau_{зд}$ , с, токсичных веществ определяется по зависимостям [8]

$$\tau_k = V_{\Gamma} \delta_k / (K_{\Pi} S_k \Delta P), \quad \tau_{зд} = 1 / \sum_{i=1}^n \tau_n,$$

где  $V_{\Gamma}$  – приведенный объем токсичного газа, проникающего в подкостюмное пространство,  $\text{м}^3$ ;

$\delta_k$  – толщина слоя оболочки костюма, м;

$K_{\Pi}$  – коэффициент проницаемости,  $(\text{м}^3 \cdot \text{с})/\text{кг}$ ;

$S_k$  – площадь поверхности костюма,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta P$  – перепад парциального давления токсичного вещества по обе стороны оболочки, Па.

Известно, что если оболочку костюма выполнить не однослойной, а двухслойной, то ее защитная способность также увеличится минимум в два раза, а если учесть наличие между слоями воздушной прослойки, то увеличение защитной способности должно быть еще большим. Однако в данном методе расчета влияние воздушной прослойки учесть невозможно. Проведенные расчеты показывают, что для обеспечения заданной защитной способности костюма по хло-

рбензолу (основное вредное вещество с наибольшим коэффициентом токсичной опасности – данные приведены в разделе 2) необходимо подобрать материал его наружной оболочки толщиной 15 мм, имеющий коэффициент проницаемости, близкий к значению  $K_{\Pi} = 1,23 \cdot 10^{-16} \text{ (м}^3 \cdot \text{с) / кг}$ . В этом случае время защитного действия однослойного костюма будет равно 180,3 мин., что, как будет приведено ниже, является значением в два раза завышенным.

Теоретические исследования тепломассопереноса в защитной одежде при одновременном воздействии температуры окружающей среды и химических веществ не проводили, а количество ОЭ-2 в пододежном пространстве куртки, костюма, в основном, определяли экспериментальным путем.

Как отмечено выше, при разработке газозащитных (химических) костюмов исследовали проницаемость материалов и их оболочек в специальном боксе, а время защитного действия от температуры – в микроклиматической (тепловой) камере НИИГД «Респиратор».

3.3. Математическая модель процесса тепломассопереноса в системе «окружающая среда – газотеплозащитный (теплозащитный) костюм – человек – физическая нагрузка»

3.3.1. Исследование процесса тепломассопереноса в газо- и теплозащитной оболочках костюмов

С учетом схемного решения газозащитного костюма (см. рис. 3.4) рассмотрим процессы тепломассопереноса в трёхслойной оболочке костюма – комбинезоне (рис. 3.14): 1 – наружный слой; 2 – воздушная прослойка; 3 – внутренний слой. Оболочка подвержена тепловому воздействию со стороны окружающей среды извне, тела человека изнутри и химическому – окружающей среды. В воздушной прослойке подкостюмного пространства расположены источники поглощения теплоты: ОЭ-2.

Для построения математической модели процессов переноса субстанции (теплоты или химического вещества) в оболочке костюма вводится пространственная координата  $h$ , м, отсчитываемая от наружной поверхности костюма, по нормали вглубь оболочки (см. рис. 3.14). Принимается допущение, что по поверхности любого слоя оболочки (в направлениях, перпендикулярных  $Oh$ ) субстанция распределена равномерно, т.е. градиент субстанции по площади слоёв оболочки, в окрестности исследуемого фрагмента костюма, пренебрежимо мал по сравнению с градиентом вглубь оболочки, задача рассматривается в одномерной постановке. Текущее время  $\tau$ , с, отсчитывается с момента попадания человека в защитном костюме в среду с повышенным содержанием субстанции. Динамика распределения субстанции по толщине защитной оболочки описывается дифференциальным уравнением вида [5,8-10]

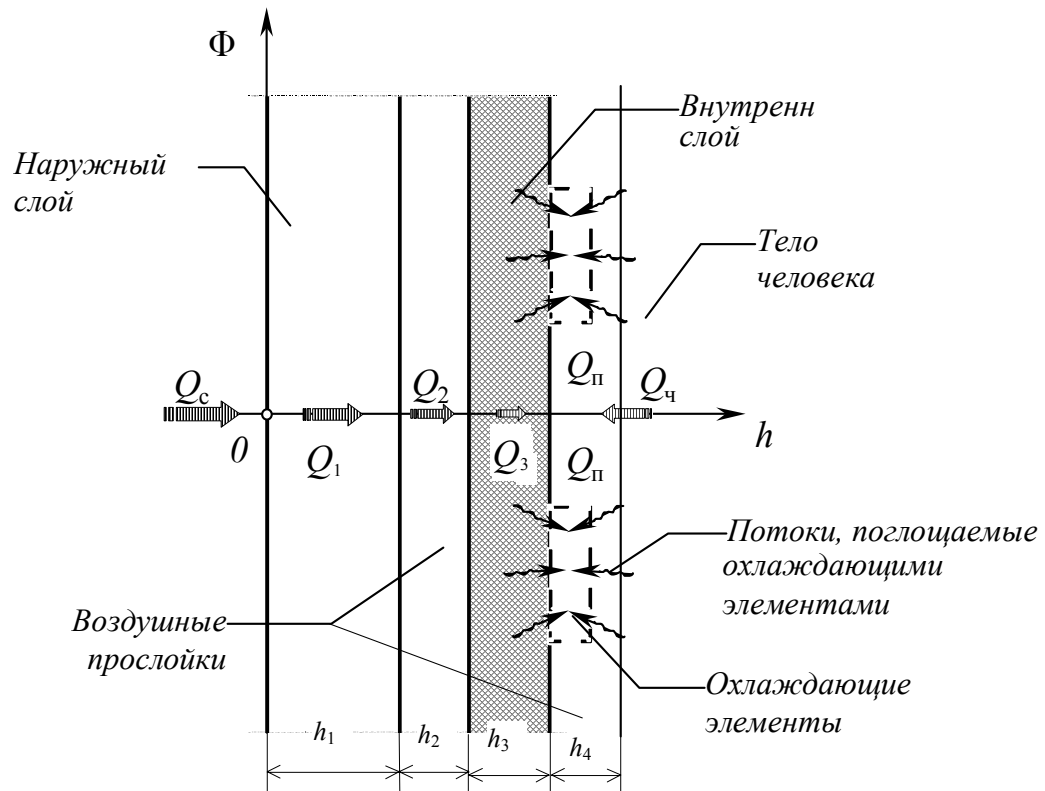


Рис. 3.14. Расчетная схема оболочки костюма

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = \varphi^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial h^2}, \quad (3.24)$$

где  $\Phi = \Phi(h, \tau)$  – физическая переменная, характеризующая температуру,  $T$ , К, вызванную тепловым потоком  $Q_C$ , Вт, или концентрацию  $C$ , кг/м<sup>3</sup>, химических веществ – потоком их массы, кг/с;

$\varphi^2 = \varphi^2(h)$  – коэффициент диффузионной проводимости материала оболочки: температуропроводности  $\alpha^2$  или диффузии  $D_1^2$ , м<sup>2</sup>/с.

Принимается, что во внешней среде концентрация  $\Phi_c$  постоянна:

$$\Phi|_{h<0} = \Phi_c = \text{const}. \quad (3.25)$$

Далее предполагается, что в начальный момент времени концентрация в оболочке  $\Phi_0$  – минимальная и одинакова во всех слоях, а именно:

$$\Phi|_{\tau=0} = \Phi_0 = \text{const}. \quad (3.26)$$

Проникновение субстанции из внешней среды в оболочку и из оболочки в

подкостюмное пространство (ПП) моделируется, в соответствии с законом Ньютона, граничными условиями третьего рода:

$$\sigma_c (\Phi_c - \Phi_1|_{h=0}) = -\varphi_1^2 \frac{\partial \Phi_1}{\partial h} \Big|_{h=0} ; -\varphi_3^2 \frac{\partial \Phi_3}{\partial h} \Big|_{h=\Delta} = \sigma_\Pi (\Phi_3|_{h=\Delta} - \Phi_\Pi), \quad (3.27)$$

где нижний индекс  $i=1,3$  указывает на значение переменной в пределах  $i$ -го слоя;  $\Delta = \sum_{i=1}^3 h_i$  – суммарная толщина слоёв оболочки, м;

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя или прослойки, м;

$\sigma_c$  и  $\sigma_\Pi$  – коэффициенты обмена субстанцией между средой и оболочкой и между оболочкой и ПП, м/с.

Предполагаем, что обмен субстанцией на границах воздушной прослойки (см. рис. 3.14) происходит по закону Фурье, что соответствует граничным условиям четвёртого рода

$$\Phi_i|_{h=\delta_i} = \Phi_{i+1}|_{h=\delta_i} ; \quad \varphi_i^2 \frac{\partial \Phi_i}{\partial h} \Big|_{h=\delta_i} = \varphi_{i+1}^2 \frac{\partial \Phi_{i+1}}{\partial h} \Big|_{h=\delta_i}, \quad (3.28)$$

где нижний индекс  $i=1,2$  указывает на значение переменной в пределах  $i$ -го слоя или прослойки;  $\delta_1 = h_1$ ;  $\delta_2 = h_1 + h_2$ .

Количество субстанции, проникшей в ПП, может быть определено на основании уравнения её баланса:

$$Q_\Pi = Q_c + Q_\Pi + Q_\Pi + Q_\Pi, \quad (3.29)$$

где  $Q$  – поток субстанции: тепловой поток, Вт, или массовый расход вредного вещества кг/с; индексы указывают соответственно на поток субстанции в ПП: «п» – аккумулированной в текущий момент; «с» – проникшей из внешней среды через оболочку; «ш» – проникшей из внешней среды через швы и прочие не герметичные узлы костюма; «ч» – от тела человека; «и» – поглощаемой или выделяемой ОЭ-2. В дальнейшем предполагается, что величины  $Q_\Pi$  и  $Q_\Pi$  – известные константы.

Для процесса переноса теплоты (3.29) представим в виде

$$\rho c_p V_\Pi \frac{dT_\Pi}{d\tau} = \alpha_\Pi S_\Pi (T_\Delta - T_\Pi) + Q_\Phi - \alpha_3 S_3 (T_\Pi - T_3), \quad (3.30)$$

где  $\rho$  – плотность среды ПП, кг/м<sup>3</sup>;

$c_p$  – удельная теплоёмкость среды ПП, Дж/(кг · К);

$V_\Pi$  – объём ПП, м<sup>3</sup>;

$T_{\Pi}$  – температура в ПП, К;  
 $\alpha_{\Pi}$  – суммарный коэффициент конвективного и лучистого теплообмена между внутренней поверхностью оболочки и ПП, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  
 $S_{\Pi}$  – площадь внутренней поверхности оболочки, м<sup>2</sup>;  
 $T_{\Delta} = T_3|_{h=\Delta}$  – температура внутренней поверхности оболочки, К;  
 $Q_{\Phi} = Q_{\text{ч}} + Q_{\text{ш}}$  – суммарные тепловые потоки от тела человека, через швы и не герметичные узлы из внешней среды (фоновые потоки), Вт;  
 $\alpha_3$  – суммарный коэффициент конвективного и лучистого теплообмена между поверхностью оболочки охлаждающих элементов и ПП, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  
 $S_3$  – суммарная площадь поверхности охлаждающих элементов, м<sup>2</sup>;  
 $T_3$  – температура охлаждающих элементов, К.  
 В свою очередь баланс массы вредного вещества опишем уравнением:

$$V_{\Pi} \frac{\partial C_{\Pi}}{\partial \tau} = \sigma_{\Pi} S_{\Pi} (C_{\Delta} - C_{\Pi}), \quad (3.31)$$

где  $C_{\Delta} = C|_{h=\Delta}$  – концентрация вредного вещества на внутренней поверхности оболочки.

Если обе части уравнения (3.30) разделить на  $(\rho \cdot c_p \cdot V_{\Pi})$ , а уравнения (3.8) – на  $V_{\Pi}$ , то их запишем в принятых обозначениях одним уравнением:

$$\frac{\partial \Phi_{\Pi}}{\partial \tau} = \frac{\sigma_{\Pi}}{\delta_{\Pi}} (\Phi_{\Delta} - \Phi_{\Pi}) + q_{\Phi} + \frac{\sigma_3}{\delta_3} (\Phi_{\Pi} - \Phi_3), \quad (3.32)$$

где для процесса теплопереноса:  $\sigma_{\Pi} = (\alpha_{\Pi} S_{\Pi}) / (\rho c_p)$  и  $\sigma_3 = (\alpha_3 S_3) / (\rho c_p)$  – относительные величины коэффициентов теплообмена, м/с;

$q_{\Phi} = Q_{\Phi} / (\rho c_p V_{\Pi})$  – относительная величина фоновой мощности теплового потока, К/с;

$\delta_{\Pi} = V_{\Pi} / S_{\Pi}$  и  $\delta_3 = V_3 / S_3$  – условная толщина ПП и охлаждающих элементов, м;

$\Phi_{\Delta} = \Phi|_{h=\Delta}$  – концентрация субстанции на внутренней поверхности оболочки.

При исследовании процесса переноса химических веществ последние два слагаемых в правой части (3.32) приравняли нулю.

Следовательно, по динамике концентрации субстанции на внутренней поверхности оболочки с помощью (3.32) имеется возможность прогнозировать её содержание в ПП, а значит и пропускную способность оболочки. Величину  $C_{\Delta}$  (или  $T_{\Delta}$ ) определим из решения уравнения (3.24) с краевыми условиями (3.25-3.28).

Из решения уравнения (3.32) следует, что на каждом временном шаге концентрация в ПП в зависимости от концентрации на внутренней поверхности оболочки имеет вид

$$\Phi_{\Pi} = \frac{1}{\sigma_{\Pi\Xi}} \Phi_{\Pi} - \left( \frac{1}{\sigma_{\Pi\Xi}} \Phi_{\Pi} - \Phi_0 \right) \cdot e^{-\sigma_{\Pi\Xi} \cdot \tau}, \quad (3.33)$$

где обозначено  $\sigma_{\Pi\Xi} = \frac{\sigma_{\Pi}}{\delta_{\Pi}} - \frac{\sigma_{\Xi}}{\delta_{\Xi}}$ ;  $\Phi_{\Pi} = \frac{\sigma_{\Pi}}{\delta_{\Pi}} \Phi_{\Delta} - \frac{\sigma_{\Xi}}{\delta_{\Xi}} \Phi_{\Xi} + q_{\Phi}$ . (3.34)

Данная аналитическая зависимость  $\Phi_{\Pi}$  от  $\Phi_{\Delta}$  позволяет прогнозировать пропускную способность оболочки по концентрации на её внутренней поверхности.

В качестве примера такого прогноза на рис. 3.15 представлен один из результатов расчёта поля концентрации вредного вещества в оболочке (при отсутствии внутренних источников), полученный на основании решения поставленной задачи в случае:  $\varphi_1^2 = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\varphi_2^2 = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\varphi_3^2 = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\sigma_c = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ г/с}$  и толщине слоёв  $h_1 = 5 \text{ мм}$ ;  $h_2 = 10 \text{ мм}$ ;  $h_3 = 3 \text{ мм}$ .

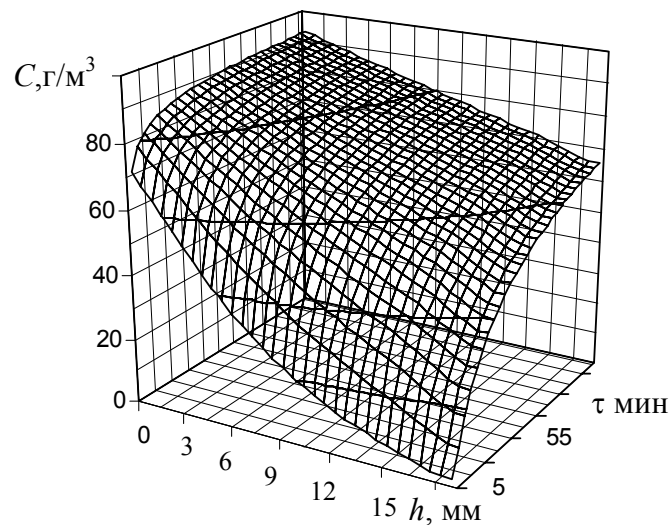


Рис. 3.15. Поле концентраций химического вещества в оболочке комбинезона

В данном случае концентрация вредного вещества в ПП может достичь половины концентрации во внешней среде через 1 ч, заметна тенденция стремления поверхности поля концентрации оболочки к плоскости, т.е. к стационарному распределению концентрации уже через 2 ч.

Для исследования поля концентрации в общем случае решение задачи

представим в безразмерных переменных

$$\theta_i = \frac{\Phi - \Phi_0}{\Phi_c - \Phi_0}; \quad \eta = \frac{h}{\Delta}; \quad Fo = \frac{\varphi_1^2 \cdot \tau}{\Delta^2}; \quad Bi = \frac{\sigma_c \cdot \Delta}{\varphi_1^2}, \quad (3.35)$$

следующим образом:

$$\theta_i = -\beta_i \left[ 1 - \psi \left( \frac{\eta}{2 \cdot \xi_i \cdot \sqrt{Fo}} \right) \right], \quad (3.36)$$

$$\text{где } b_1 = -\frac{Bi \cdot \sqrt{\pi \cdot Fo}}{1 + Bi \cdot \sqrt{\pi \cdot Fo}}; \quad \beta_i = \beta_{i-1} \frac{1 - \psi \left( \frac{\eta_{i-1}}{2 \cdot \xi_{i-1} \cdot \sqrt{Fo}} \right)}{1 - \psi \left( \frac{\eta_{i-1}}{2 \cdot \xi_i \cdot \sqrt{Fo}} \right)}, \quad i=2,3; \quad (3.37)$$

$$\eta_{i-1} = \delta_{i-1} / \Delta, \quad i=2,3; \quad \xi_1 = 1; \quad \xi_2 = \varphi_2 / \varphi_1; \quad \xi_3 = \varphi_3 / \varphi_1.$$

В результате моделирования поля концентрации различных химических веществ в оболочке защитного костюма в соответствии с (3.36) определили необходимую проводимость её слоёв при заданной концентрации во внешней среде в зависимости от требуемого периода защитного действия и допустимой концентрации в подкостюмном пространстве, приведенных в разделе 1.

В частности получили, что в случае содержания хлорбензола во внешней среде  $C_c = 17,0 \text{ г/м}^3$  и допустимой концентрации  $0,05 \text{ г/м}^3$ , для обеспечения защиты человека в костюме в течение 180 мин, при толщине слоёв, указанных в предыдущем примере, проводимость наружного слоя должна быть величиной порядка  $D_1 \approx 10^{-11} \text{ мм}^2/\text{с}$  ( $Bi = 0,06$ ;  $Fo = 0,14$ ). Динамика концентрации в оболочке костюма в этом случае приведена на рис. 3.16, где нижняя кривая соответствует моменту времени 20 мин, следующая – 100 мин, верхняя – 200 мин; промежуточные кривые рассчитаны и построены с интервалом 20 мин.

Таким образом, в отличие от ранее полученных результатов исследований, представленная математическая модель позволяет производить прогноз динамики, как температуры, так и концентрации химических веществ не через однослойную оболочку, а в любом её слое.

Разработанная математическая модель и полученные результаты использовали при проектировании костюма с известной проводимостью и толщиной оболочки, а также для решения обратной задачи – определения физико-химических и геометрических параметров слоёв и прослоек оболочки, при которых обеспечивается требуемая защита.

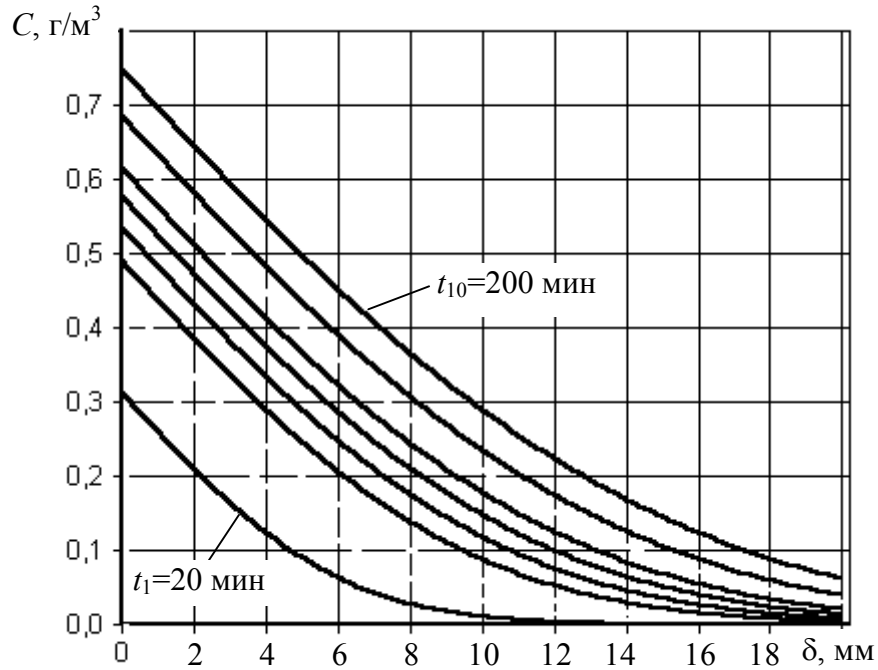


Рис. 3.16. Динамика концентрации хлорбензола в слоях оболочки комбинезона с интервалом 20 мин при ее концентрации во внешней среде  $C_c = 17,0 \text{ г/м}^3$

### 3.3.2. Моделирование динамики таяния льда в охлаждающем элементе ОЭ-2

В предыдущем подразделе представлено уравнение (3.30) и получена формула (3.33), которые можно использовать для расчёта температуры в ПП при наличии данных о температуре ОЭ-2 в каждый момент времени. В свою очередь динамика последней определяется температурой на его поверхности, а, следовательно, температурой в ПП.

Так как отдельная секция ОЭ-2 имеет цилиндрическую форму, то динамику температуры в нем опишем системой дифференциальных уравнений, подобных (3.24) [5,11]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial \tau} &= a_{\Pi}^2 \frac{\partial^2 T_{\Pi}}{\partial r^2}, \quad r \in (-\delta_0; 0) \\ \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} &= \tilde{a}^2 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial r^2}, \quad r \in (0; x) \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} &= \bar{a}^2 \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2}, \quad r \in (x; R) \end{aligned} \right\}, \quad (3.38)$$

где  $r$  – координата, отсчитываемая от поверхности ОЭ-2, по нормали к ней, к центру ОЭ-2, м, (рис. 3.17);

$x$  – значение координаты на границе фазового превращения льда в воду, м;



$R$  – радиус основания ОЭ-2, м;

$x^* = R$  предельная глубина фронта плавления льда, м;

$a_{\text{п}}^2 \approx 1,87 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  – температуропроводность ПП;

$\tilde{T}$  – температура воды, К;

$\tilde{a}^2 \approx 1,30 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  – температуропро-

водность воды;

$\bar{T}$  – температура льда, К;

$\bar{a}^2 \approx 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – температуропро-

водность льда;

$\delta_{\text{п}}$  – толщина пленки, м.

Считаем, что координата фронта фазового превращения является функцией времени:

$x = x(t)$ .

Принимаем следующие начальные условия:

$$T_{\text{п}}(r, 0) = T_0; \quad \bar{T}(r, 0) = T_0 - \Delta_0; \quad x(0) = 0, \quad (3.39)$$

где  $\Delta_0$  – разность между нормальной температурой и начальной температурой льда, К.

Фактически температура в подкостюмном пространстве с течением времени отличается от начальной  $T_0$ . Однако предполагаем, что расчёт температуры ОЭ-2, как и температуры оболочки, будет производиться в малые дискретные моменты времени, в пределах которых температуру в ПП можно считать постоянной.

На поверхности ОЭ-2 зададим граничные условия третьего рода:

$$\alpha_3 (T_{\text{п}}|_{r=-\Delta r} - \tilde{T}|_{r=0}) = -\tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \Big|_{r=0}, \quad (3.40)$$

где  $\alpha_3$  – коэффициент теплообмена между подкостюмным пространством и ОЭ-2, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Delta r$  – элементарное (бесконечно малое) расстояние от поверхности ОЭ-2, м;

$\tilde{\lambda} \approx 0,544 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  – теплопроводность воды.

На границе фазового превращения температура воды и льда равна температуре плавления льда  $\dot{T} = 273 \text{ К} = 0^\circ \text{С}$ :

$$\tilde{T}|_{r=x} = \bar{T}|_{r=x} = \dot{T}, \quad (3.41)$$

а разность тепловых потоков пропорциональна скорости продвижения границы

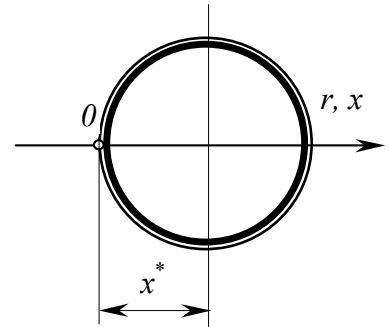


Рис. 3.17. Расчетная схема охлаждающего элемента

фазовых превращений:

$$\tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} - \bar{\lambda} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \eta_0 \frac{\partial x}{\partial \tau}, \quad (3.42)$$

где  $\eta_0 \approx 3,06 \cdot 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> – удельная теплота фазового превращения.  
Так как

$$\alpha_3 (T_{\Pi}|_{r=-\Delta r} - \tilde{T}|_{r=0}) = \alpha_3 \Delta r \frac{T_{\Pi}|_{r=-\Delta r} - \tilde{T}|_{r=0}}{\Delta r} = -\lambda_{\Pi} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial r} \Big|_{r=0}, \quad (3.43)$$

где  $\lambda_{\Pi} \approx 0,024$  Вт/(м·К) – теплопроводность ПП, то после подстановки (3.43) в (3.40) на поверхности ОЭ-2 получим граничное условие четвёртого рода

$$\lambda_{\Pi} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial r} \Big|_{r=0} = \tilde{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} \Big|_{r=0}, \quad (3.44)$$

которое дополним условием непрерывности температурного поля

$$T_{\Pi}(0, \tau) = \tilde{T}(0, \tau). \quad (3.45)$$

Тогда общее решение (3.38) представим в виде

$$T_{\Pi} = A_{\Pi} + B_{\Pi} \cdot \psi(z_{\Pi}); \quad \tilde{T} = \tilde{A} + \tilde{B} \cdot \psi(\tilde{z}); \quad \bar{T} = \bar{A} + \bar{B} \cdot \psi(\bar{z}), \quad (3.46)$$

где  $A_{\Pi}, B_{\Pi}, \tilde{A}, \tilde{B}, \bar{A}, \bar{B}$  – определяются из краевых условий;

$\psi(z) = 2 / \sqrt{\pi} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi$  – интегральная функция или так называемая функция ошибок  $erf(z)$ ;

$$z_{\Pi} = \frac{r}{2 \cdot a_{\Pi} \cdot \sqrt{\tau}}, \quad \tilde{z} = \frac{r}{2 \cdot \tilde{a} \cdot \sqrt{\tau}} \text{ и } \bar{z} = \frac{r}{2 \cdot \bar{a} \cdot \sqrt{\tau}} - \text{значения безразмерной}$$

пространственной координаты в пределах подкостюмного пространства, жидкой и твёрдой фаз ОЭ-2 соответственно.

Из граничного условия (3.41) с учётом (3.46) следует, что

$$\tilde{A} + \tilde{B} \cdot \psi\left(\frac{x}{2 \cdot \tilde{a} \cdot \sqrt{\tau}}\right) = \bar{A} + \bar{B} \cdot \psi\left(\frac{x}{2 \cdot \bar{a} \cdot \sqrt{\tau}}\right) = \dot{T}. \quad (3.47)$$

Поскольку в правой части (3.47) константа – левая часть уравнения не должна зависеть от координаты и времени, а это возможно при условии

$$x = 2 \cdot \dot{a} \cdot \sqrt{\tau}, \quad (3.48)$$

где  $\dot{a} = \text{const}$  – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность  $\text{м}/\sqrt{\text{с}}$ , то на основании (3.42), в соответствии с (3.47) и (3.48) для определения  $\dot{a}$  получаем следующее уравнение

$$\frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{a}} \cdot \tilde{B} \cdot e^{-\frac{\dot{a}^2}{\tilde{a}^2}} - \frac{\bar{\lambda}}{\bar{a}} \cdot \bar{B} \cdot e^{-\frac{\dot{a}^2}{\bar{a}^2}} = \sqrt{\pi} \cdot \eta \cdot \dot{a}. \quad (3.49)$$

Решение этого уравнения может быть получено только численными (итерационными) методами. Коэффициенты решения уравнения (3.46) определяем в следующем порядке.

Из первого начального условия (3.39), с учётом, что при  $r \leq 0$  и  $\tau \rightarrow 0$ :  $\psi \rightarrow -1$ , следует

$$A_{\pi} = T_0 + B_{\pi}, \quad (3.50)$$

далее, на основании (3.44):

$$\frac{\lambda_{\pi}}{a_{\pi}} B_{\pi} = \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{a}} \tilde{B}, \text{ тогда } B_{\pi} = \tilde{b} \cdot \tilde{B}, \quad (3.51)$$

где обозначено  $\tilde{b} = (\tilde{\lambda} \cdot a_{\pi}) / (\lambda_{\pi} \cdot \tilde{a})$ .

Равенство температуры ПП и ОЭ-2 у поверхности (3.44) для решения (3.45) будет выполняться, если

$$\tilde{A} = A_{\pi}, \quad (3.52)$$

откуда после подстановки (3.51) в (3.50), а затем (3.50) в (3.52), получаем

$$\tilde{A} = T_0 - B_{\pi} = T_0 - \tilde{b} \cdot \tilde{B}. \quad (3.53)$$

Связь между  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$  определяем из второго начального условия (3.39):

$$\bar{A} = T_0 - \Delta_0 - \bar{B}. \quad (3.54)$$

С учётом (3.53) и (3.54) на основании (3.47) для определения  $\tilde{B}$  и  $\bar{B}$  получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} T_0 - \tilde{b} \cdot \tilde{B} + \psi(\dot{a}/\tilde{a}) &= \dot{T} \\ (T_0 - \Delta_0 - \bar{B}) + \bar{B} + \psi(\dot{a}/\bar{a}) &= \dot{T} \end{aligned} \right\}, \quad (3.55)$$

из которой следует

$$\tilde{B} = \frac{T_0 - \dot{T}}{\tilde{b} - \psi(\dot{a}/\tilde{a})}; \quad \bar{B} = \frac{T_0 - \dot{T}}{1 - \psi(\dot{a}/\bar{a})}. \quad (3.56)$$

В результате уравнение (3.49) для определения  $\dot{a}$  преобразуем к следующему виду:

$$\dot{a} = \frac{T_0 - \dot{T}}{\eta \cdot \sqrt{\pi}} \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{a}} \left[ \frac{1}{\tilde{b} - \psi(\dot{a}/\tilde{a})} e^{-\dot{a}^2/\tilde{a}} - \bar{b} \frac{1 - \bar{\Delta}_0}{1 - \psi(\dot{a}/\bar{a})} e^{-\dot{a}^2/\bar{a}} \right], \quad (3.57)$$

где

$$\bar{b} = \frac{\bar{\lambda} \cdot \tilde{a}}{\tilde{\lambda} \cdot \bar{a}}; \quad \bar{\Delta}_0 = \frac{\Delta_0}{T_0 - \dot{T}}. \quad (3.58)$$

Таким образом, для проведения расчётов температуры ОЭ-2 по формулам (3.46) необходимо вначале определить параметр  $\dot{a}$  фронта фазовых превращений из уравнения (3.57), затем рассчитать  $\bar{B}$ ,  $\tilde{B}$ ,  $B_{\Pi}$  по формулам (3.56), (3.51) и  $\bar{A}$ ,  $\tilde{A}$ ,  $A_{\Pi}$  – по (3.54), (3.53), (3.52). Моделирование динамики температурного поля по глубине ОЭ-2 необходимо начинать с определения положения границы фазовых превращений по формуле (3.48) в заданный момент времени. Расчёты производим до момента времени достижения фронта плавления льда в ОЭ-2.

В качестве примера на рис. 3.18 приведены результаты расчета динамики температуры ОЭ-2 при максимальной температуре в пододежном пространстве 40 °С.

При этом получено значение  $\dot{a} \approx 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}}$  и период таяния

$$\tau^* = \frac{x^{*2}}{4 \cdot \dot{a}^2}, \quad (3.59)$$

составляет от 50 до 60 мин. Погрешность расчёта (отношение абсолютной величины разницы между левой и правой частями уравнения (3.34) к значению функции правой части) соответственно составила 1,7 % и 1, 2 %.

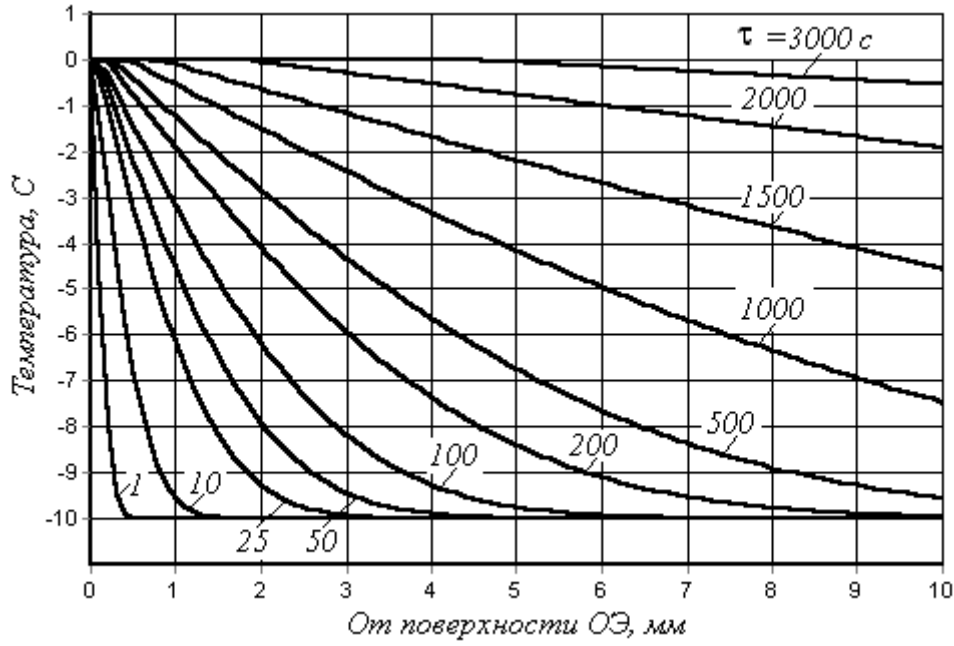


Рис. 3.18. Динамика температуры ОЭ-2 при  $T_0 = 40^\circ \text{C}$

Для исследования динамики температуры воды в ОЭ-2 после таяния льда ( $\tau \geq \tau^*$ ) используем второе уравнение системы (3.38) в виде

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{\tau}} = \tilde{a}^2 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{r}^2}, \quad (3.60)$$

где  $\tilde{\tau} = \tau - \tau^*$  – время с момента завершения периода таяния льда, с;

$\tilde{r} = R - r$  – координата, отсчитываемая от оси ОЭ-2 в радиальном направлении к его поверхности, м, с начальным условием

$$T(\tilde{r}, 0) = \dot{T} \quad (3.61)$$

и граничными условиями

$$-\tilde{\lambda}_3 \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=0} = \tilde{\alpha}_3 (\tilde{T}|_{\tilde{r}=0} - T_{\text{п}}); \quad \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=R} = 0, \quad (3.62)$$

где  $\tilde{\lambda}_3 \neq \lambda_3$  и  $\tilde{\alpha}_3 \neq \alpha_3$  – коэффициенты теплопроводности ОЭ-2 и теплообмена между ПП и ОЭ-2 после завершения периода таяния льда.

Решение этого уравнения с представленными краевыми условиями имеет вид:

$$\tilde{T}(\tilde{\xi}, \tilde{Fo}) = \dot{T} + (T_{\text{п}} - \dot{T}) \cdot \left[ 1 - \frac{1}{4} \cdot \left( 1 + \frac{2}{\tilde{Bi}} - \tilde{\xi}^2 \right) \cdot \dot{A} \cdot e^{-\dot{A} \cdot \tilde{Fo}} \right], \quad (3.63)$$

где  $\tilde{Fo} = \frac{a^2 \cdot \tilde{\tau}}{R^2}$  – относительная величина времени (число Фурье);  $\tilde{\xi} = \frac{\tilde{r}}{R}$  – относительная величина пространственной координаты;  $\tilde{Bi} = \frac{\tilde{\alpha}_3}{\tilde{\lambda}_3} \cdot R$  – число Био;

$$\dot{A} = \frac{6 \cdot \tilde{Bi}(\tilde{Bi} + 4)}{\tilde{Bi}^2 + 6 \cdot \tilde{Bi} + 12}. \quad (3.64)$$

Результаты одного из вариантов расчётов безразмерной (избыточной) температуры воды при  $\tilde{Bi}=1,0$  в диапазоне  $\tilde{Fo}=0,1 \dots 3,0$  приведены на рис. 3.19, где

$$\tilde{t}(\tilde{\xi}, \tilde{Fo}) = 1 - \frac{1}{4} \cdot \left( 1 + \frac{2}{\tilde{Bi}} - \tilde{\xi}^2 \right) \cdot \dot{A} \cdot e^{-\dot{A} \cdot \tilde{Fo}}.$$

Таким образом, в отличие от результатов, полученных ранее [6], где температура ОЭ-2 в течение всего периода функционирования системы охлаждения принималась постоянной и равной 0 °С, представленная математическая модель позволяет достоверно моделировать динамику температуры ОЭ-2 как в процессе таяния льда, так и после его завершения (нагревание воды в ОЭ-2). Кроме того, замена многослойной оболочки одним эквивалентным, по тепловой проводимости, слоем и представление второй производной температуры по пространственной переменной в уравнении теплопроводности конечными разностями, предпринятые авторами указанной работы с целью получения простого аналитического решения в виде экспоненциальной зависимости температуры в оболочке и ПП от времени – не позволяют моделировать фактическое снижение температуры в ПП в начальный период эксплуатации. Это заведомо завышает рассчитанные исследователями необходимые запасы хладагента.

Полученная аналитическая зависимость температуры растаявшего льда ОЭ-2 от температуры в ПП и интенсивности теплообмена с внешней средой и телом человека использованы в свою очередь при моделировании динамики температуры в ПП с использованием ОЭ-2.

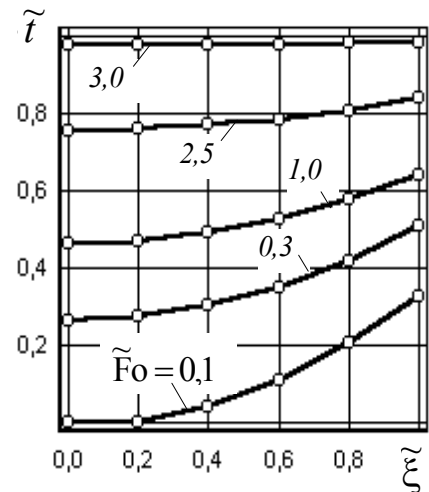


Рис. 3.19. Динамика температуры нагревания ОЭ-2 при  $\tilde{Bi}=1, \tilde{Fo}=0,1 \dots 3,0$

### 3.3.3. Моделирование динамики температуры в подкостюмном пространстве

Для исследования динамики температуры в ПП с учетом полученных выше результатов вновь обратимся к уравнению (3.30).

Итак, в соответствии с (3.30), количество теплоты, Вт, аккумулированное в ПП (левая часть уравнения), равно алгебраической сумме теплового потока, проникшего в ПП извне  $Q_c = \alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi} \cdot (T_{\Delta} - T_{\Pi})$ ; теплового потока, поглощаемого ОЭ-2  $Q_3 = \alpha_3 \cdot S_3 \cdot (T_{\Pi} - T_3)$  и фонового теплового потока  $Q_{\Phi}$ . Отсюда следует, что динамика температуры в ПП зависит как от соотношения интенсивностей теплообмена  $\bar{\alpha}_3 = \alpha_3 / \alpha_{\Pi}$  (между ОЭ-2 и ПП, оболочкой и ПП), так и от соотношения  $\bar{S}_3 = S_3 / S_{\Pi}$  между суммарной площадью всех ОЭ-2, расположенных в ПП, и площадью внутренней поверхности оболочки. Для определения характера этой зависимости перейдем к нахождению решения (3.30), в котором, в отличие от (3.33), будут фигурировать безразмерные комплексы, которые обозначим:  $\alpha = \bar{\alpha}_3$  и  $s = \bar{S}_3$ . Разделим обе части (3.30) на удельный тепловой поток извне  $q_{\Pi} = \alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi}$ , Вт/К. В результате получим

$$\tau_{\Delta} \frac{\partial T_{\Pi}}{\partial \tau} = (T_{\Delta} - T_{\Pi}) - \alpha \cdot s \cdot (T_{\Pi} - T_3) + \Delta T_{\Phi}, \quad (3.65)$$

где  $\tau_{\Delta} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot V_{\Pi}}{\alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi}}$  – время, в течение которого в ПП аккумулируется теплота, проникшая извне, с;

$$\Delta T_{\Phi} = \frac{Q_{\Phi}}{\alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi}} \quad (3.66)$$

где  $\Delta T_{\Phi}$  – приращение температуры в ПП за счёт фонового теплового потока, К.

Введём безразмерные переменные: относительное время и относительную температуру, соответственно.

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_{\Delta}}, \quad t = (T_0 - T_3) / (T_{\Delta} - T_3). \quad (3.67)$$

С учетом этих переменных (3.65) представим в виде

$$\frac{dt_{\Pi}}{d\bar{\tau}} + (1 + \alpha \cdot s) \cdot t_{\Pi} = 1 + \Delta t_{\Phi}.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$t_{\pi} = e^{-\int (1+\alpha \cdot s) d\bar{\tau}} \left[ \int (1 + \Delta t_{\phi}) \cdot e^{-\int (1+\alpha \cdot s) d\bar{\tau}} d\bar{\tau} + \text{const} \right]. \quad (3.68)$$

После интегрирования получаем

$$t_{\pi} = \frac{1 + \Delta t_{\phi}}{1 + \alpha s} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1 + \alpha s}{1 + \Delta t_{\phi}} \cdot t_0 \right) \cdot e^{-(1+\alpha s) \cdot \bar{\tau}} \right], \quad (3.69)$$

где  $t_0 = (T_0 - T_9)/(T_{\Delta} - T_9)$  – относительное значение начальной температуры в ПП.

Предельное (установившееся) распределение температуры в ПП по истечении длительного промежутка времени ( $\bar{\tau} \rightarrow \infty$ )

$$t_{\pi\infty} = \frac{1 + \Delta t_{\phi}}{1 + \alpha s} \quad (3.70)$$

зависит от фонового теплового потока и соотношения площадей  $s$  ОЭ-2 и ПП. Предварительные расчёты времени  $\tau_0$  по справочным данным о плотности и теплоёмкости воды и при ориентировочном значении коэффициента теплообмена  $\alpha_{\pi} \approx 2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), площади внутренней поверхности оболочки костюма  $S_{\pi} \approx 4$  м<sup>2</sup>, объёме ПП  $V_{\pi} \approx 0,04$  м<sup>3</sup> показывают, что это величина порядка 6...7 с. С другой стороны, в соответствии с (3.69),  $t_{\pi} \approx t_{\pi\infty}$  уже при  $\bar{\tau} > 5$ , поэтому зависимость температуры ПП от соотношений  $\alpha = \bar{\alpha}_9$  и достаточно точно можно исследовать на основании (3.70). Отметим, что при выполнении работ средней тяжести минимальные энергозатраты человека составляют около 280 Вт. Тогда  $1 + \Delta t_{\phi} \approx 1,1$ .

Зависимость температуры в ПП, полученная на основании (3.70) при указанных значениях входящих величин, приведена на рис. 3.20. Следовательно, имеется возможность по фактической площади поверхности всех ОЭ-2 и интенсивности теплообмена между внешней средой, ПП, ОЭ-2 и телом человека определять предельную температуру в ПП. Кроме того, используя (3.70), можно решить обратную задачу: какой должна быть эта площадь (а значит и масса хладагента) в правой части уравнения, чтобы температура в ПП не пре-

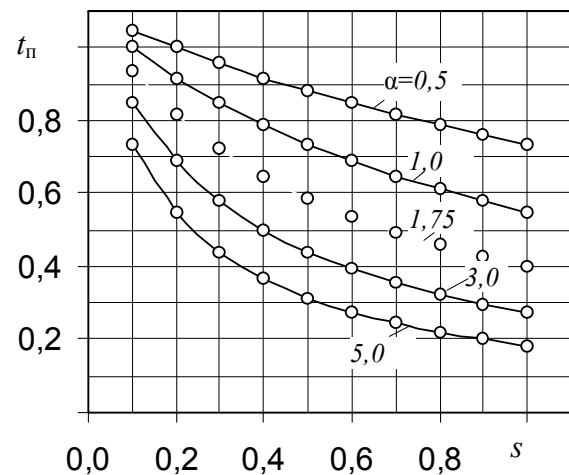


Рис. 3.20. Зависимость температуры в подкостюмном пространстве от суммарной площади ОЭ-2 и интенсивности теплообмена  $\alpha$



вышла температура внутренней поверхности оболочки на заданную величину в левой части уравнения.

Полученные результаты использовали для достижения главной цели исследований – моделирования динамики температуры в ПП с учётом изменения проводимости слоёв оболочки по её толщине и нестационарного функционирования источников поглощения теплоты, расположенных в ПП. В случае моделирования процесса проникновения теплоты в ПП методика моделирования заключается в следующем. По полученным аналитическим выражениям температуры оболочки (3.36) и ОЭ-2 (3.63) вычисляли её значения во всех слоях оболочки и по толщине ОЭ-2 через равные промежутки времени, а затем полученные результаты использовали для расчета температуры в ПП (3.69) от температуры внутренней поверхности оболочки и поверхности ОЭ-2. Далее, на очередном временном шаге полученное температурное поле использовали в качестве начального и расчёты повторяли.

Результаты моделирования динамики температуры в слоях оболочки, по радиусу ОЭ-2 и в ПП приведены на рис. 3.21-3.23.

Шаг расчётов по времени выбирали из условия сходимости результатов дискретного расчёта. На отрезках пространственных переменных шириной 0,5 мм и минимальном числе Фурье по слоям оболочки 0,167 для сходимости решения требовался шаг по времени 1,1 с.

Как следует из рис. 3.22 и 3.23, практически до окончания периода таяния льда (около 60 мин) температура в ПП не превышала стандартной величины и даже снижалась на 5°C. С началом периода нагревания воды одновременно повышалась температура в ПП и к окончанию двухчасового использования защитного костюма достигла допустимого уровня около 30 °C (см. рис. 3.23). При этом температура наружного слоя оболочки костюма достигает значения температуры окружающей среды уже в течение первых 5 мин.

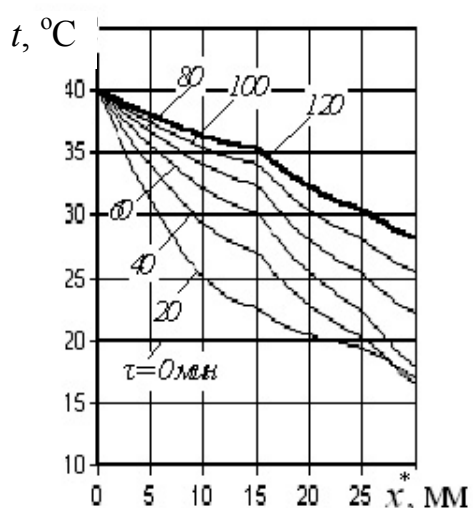


Рис. 3.21. Динамика температуры в слоях оболочки костюма

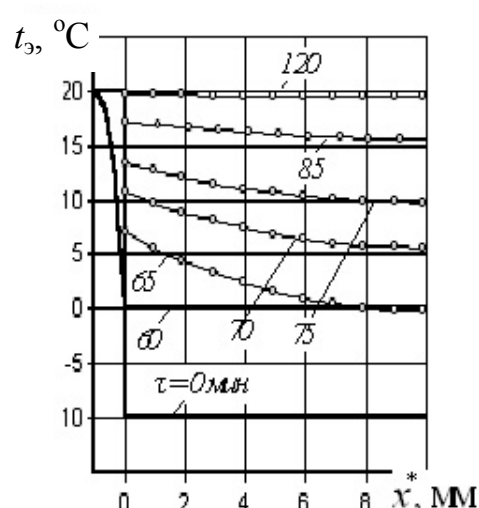


Рис. 3.22. Динамика температуры ОЭ-2 до и после таяния льда

Следовательно, результаты проведенных теоретических исследований по-

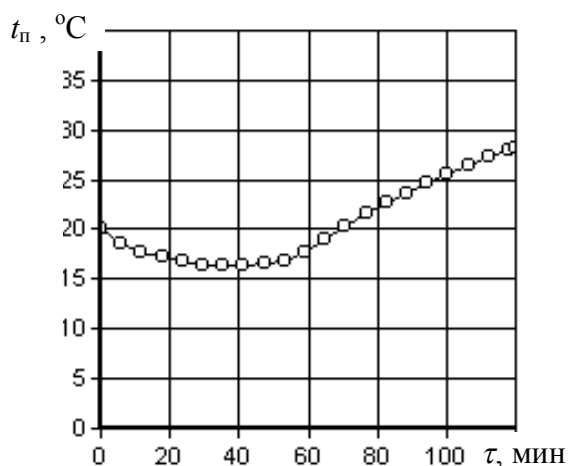


Рис. 3.23. Динамика температуры в подкостюмном пространстве

зволяют осуществлять прогноз температурных условий в ПП газотеплозащитного и теплозащитного костюмов с учётом заданных теплофизических свойств их оболочек и площади (массы) ОЭ в течение заданного допустимого времени работы членов ВГК. Применение представленных расчётных формул также позволяет исследовать влияние изменения конструкции оболочки (числа, геометрических и теплофизических параметров слоёв и прослоек) на динамику температуры у поверхности тела человека.

Таким образом, разработанная математическая модель нестационарных процессов тепломассопереноса в системе «окружающая среда - газотеплозащитный костюм - человек - физическая нагрузка» с впервые принятой расчетной схемой костюма в виде многослойной оболочки, состоящей из различных материалов и воздушных прослоек, их толщин, с водолеяной системой охлаждения, учитывает одновременное воздействие химических веществ и температуры окружающей среды, теплофизические характеристики слоев и геометрические параметры оболочки, фазовое превращение хладагента (льда в воду) и дальнейший его теплообмен, энергозатраты человека и отношение площади, занимаемой аккумуляторами холода, к площади подкостюмного пространства. Это дает возможность использовать минимальное количество аккумуляторов холода при заданном допустимом времени работы горноспасателей (членов ВГК), а, следовательно, рациональные параметры газотеплозащитного и теплозащитного костюмов.

### 3.3.4. Исследование гидродинамических и тепловых процессов в системах охлаждения одежды

Невзирая на то, что площадь поверхности рук и стоп ног человека составляет около 4 % от общей площади поверхности тела, именно эти участки являются наиболее уязвимыми в условиях пожара, от которых в первую очередь зависит длительность работы пожарных (см. подраздел 3.2). Параметры водолеяных систем охлаждения этих участков тела горноспасателей получены на основании данных экспериментальных исследований, причем для невысоких температур окружающей среды по сравнению с пожарами при ликвидации пожаров, а потому исследуем процессы, которые происходят в системах местного охлаждения (СМО) кистей рук (СОКР) и стоп ног (СОСН) и определим их параметры. Эти системы имеют простую конструкцию, надежные, безвредные и при небольших расходах на изготовление позволяют существенно улучшить

микроклимат в подкостюмном пространстве (см. рис. 3.7). Ниже представлены результаты решения задачи определения длительности рециркуляции жидкости (воды) между охлаждаемой поверхностью стоп ног и кистей рук пожарного и хладагентом в зависимости от размеров устройств СМО [12-17].

В ходе исследований принимали, что СОСН состоит из трех устройств: холодильника, трубопровода и компрессора (рис. 3.24).

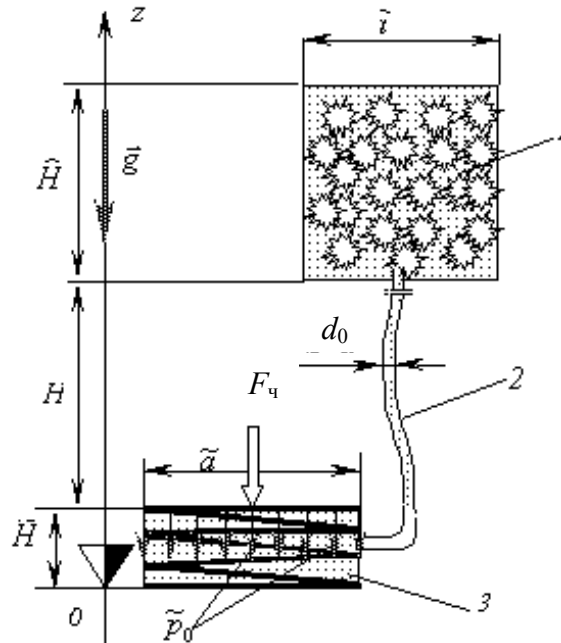


Рис. 3.24. Расчетная схема системы охлаждения стоп ног: 1 – холодильник; 2 – трубопровод; 3 – компрессор

Холодильник – карман с брикетами льда, заполненный водой; трубопровод – гибкая соединительная трубка; компрессор – сжимаемая емкость, расположенная в обуви горноспасателя в виде стельки. Компрессор служит для нагнетания жидкости в холодильник в период пребывания ноги на почве. Жидкость возвращается в компрессор после отрывания ноги от почвы.

Отсчет высоты столба жидкости в СОСН выполнялся от нижней горизонтальной плоскости компрессора. В геометрическом представлении: емкость холодильника – параллелепипед высотой  $\hat{H}$ , м, с прямоугольником в основе, размерами  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$ , м, площадью  $\hat{S} = \tilde{a} \cdot \tilde{b}$ , м<sup>2</sup>; трубопровод – цилиндр высотой  $H$ , м, и длиной  $L$ , м ( $L \geq H$ ), с кругом в основе, диаметром  $d_0$ , м, площадью  $s_1 = \pi \cdot d_0^2 / 4$ , м<sup>2</sup>; компрессор – цилиндр, высотой  $\tilde{H}$ , м, в основе эллипс с осями  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$ , м, площадью  $\tilde{S} = \pi \cdot \tilde{a} \cdot \tilde{b} / 4$ , м<sup>2</sup>.

Температуру льда принимали равной 0 °С, а верхний предел температуры пространства внутри защитного костюма не превышает 30 °С.

Анализ зависимости плотности воды от температуры в этом диапазоне, при нормальном атмосферном давлении, показал, что она практически постоянная:  $\rho_B = \rho_0 = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Кинематическая вязкость воды  $\nu_K$ , м<sup>2</sup>/с, в тех же условиях изменяется приблизительно в 5 раз.

При статичном равновесии жидкости в системе, когда ее объем находится под воздействием лишь гравитационных сил, на верхней границе компрессора, где  $z = \tilde{H}$ , давление равняется  $z_0 = \tilde{H} + H \approx 1,0 \text{ м} = 10 \text{ кПа}$ . Если вес пожарного  $F_{\text{ч}} \approx 1 \text{ кН}$ , а размеры компрессора:  $\tilde{a} \approx 25 \text{ см}$ ,  $\tilde{b} \approx 10 \text{ см}$ , то давление в компрессоре:  $\tilde{p}_0 = F_{\text{ч}} / \tilde{s} \approx 50 \text{ кПа} \gg z_0$ . Следовательно, сила веса позволяет предоставить жидкости движение из компрессора вверх по трубопроводу и в холодильник. Период истечения жидкости из компрессора назовем периодом восходящего движения жидкости (ВР), а период наполнения емкости компрессора, после поднятия ноги – периодом нисходящего движения (СР).

Скорость истечения жидкости из компрессора в период ВД,  $U^*$ , м/с, на основании формулы Торричелли:

$$U^* = \varphi_0 \sqrt{2g[\tilde{p}_0 / (\rho_0 g) - z_0]}, \quad (3.71)$$

где  $\varphi_0$  – коэффициент изменения скорости в результате сжатия потока в отверстии при истечении из компрессора;

$g$  – ускорение силы тяжести ( $g = 9,807$ , м/с<sup>2</sup>).

Коэффициент  $\varphi$  зависит от напора жидкости в компрессоре, формы и размеров отверстия истечения. По данным литературных источников среднее значение  $\varphi_0$  незначительно отличается от единицы.

Выражением  $\tilde{H}_0 = \tilde{p}_0 / (\rho_0 g)$ , м, обуславливается пьезометрический напор, зависящий от веса человека (давление  $\tilde{p}_0$ , Па).

С учетом ориентировочных размеров элементов системы:  $z_0 \approx 1,0 \text{ м}$  и пьезометрического напора в компрессоре получено  $U^* = 9,0 \text{ м/с}$ .

Потому что в принятых условиях кинематическая вязкость воды – величина порядка  $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , то при диаметре трубопровода  $d_0 = 3,0 \text{ мм} = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и характерном значении скорости  $U^*$  число Рейнольдса  $Re_v^*$  равно приблизительно 27000, что значительно превышает критическое значение  $Re_{\text{кр}} = 2300$ . Следовательно, в период ВР режим движения жидкости – турбулентен. Длительность этого периода  $\tau_v$ , с, оценивали отношением

$$\tau_v = \frac{\tilde{V}}{Q^*} = \frac{\tilde{H} \cdot \tilde{s}}{\tilde{\varphi} \cdot s_1 \cdot U^*}, \quad (3.72)$$

где  $\tilde{V}$  – объем жидкости в компрессоре, м<sup>3</sup>;

$Q^*$  – Расход жидкости через отверстие истечения, м<sup>3</sup>/с;

$\tilde{\varphi}$  – Коэффициент расхода, среднее значение которого, в отличие от  $\varphi$  в выражении для  $U^*$ , равняется 0,62.

При  $\tilde{H} = 1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$ ,  $\tilde{s} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ ,  $d_0 = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  получено:  $\tau_b \approx 5 \text{ с}$ . Выходит, в данном случае, для полного вытеснения жидкости из компрессора необходимо, чтобы нога пожарного находилась на почве не менее 5 с, а при  $\tilde{a} \approx 1 \text{ см}$  для опустошения компрессора достаточно половины секунды.

В результате полного вытекания жидкости из компрессора уровень жидкости в холодильнике, при  $\hat{s} \approx 100 \text{ см}^2 = 10^{-2} \text{ м}^2$ , повышается не более чем на  $\hat{H}_0 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

Источником движения жидкости по трубопроводу в период СР является пьезометрический напор столба жидкости, который равняется  $\Delta \hat{z} = \hat{H}_0 + \hat{H} + H \approx 1,02 \text{ м}$ . Поскольку уровень жидкости в холодильнике снижается, то скорость истекания является функцией переменной  $\hat{z} = \hat{h} + z_0$ , м, причем возможные пределы изменения  $\hat{h} : \hat{H}_0 \dots 0 \text{ м}$ . Поэтому скорость истекания жидкости из холодильника не превышает значения

$$u^* = \varphi_0 \sqrt{2g \cdot \Delta \hat{z}} = 4,5 \text{ м/с}, \quad (3.73)$$

то есть в данном случае вдвое меньше, чем в период ВР, однако режим движения жидкости по трубопроводу и в этот период – турбулентный.

В результате анализа баланса массы жидкости в устройствах СОСН получено, что длительность периода режима СР,  $\tau_n$ , с, можно оценить по формуле

$$\tau_n = \frac{\hat{s}}{s_1 \tilde{\varphi}} (\sqrt{z_0 + \hat{H}_0} - \sqrt{z_0}) \sqrt{\frac{2}{g}}. \quad (3.74)$$

С учетом принятых ранее ориентировочных значений, которые входят в эту формулу величин,  $\tau_n \approx 10 \text{ с}$  и, если диаметр трубопровода увеличить в  $\sqrt{10}$  раз, то длительность режима СР можно сократить до 1 с.

Силы трения определяются безразмерным коэффициентом гидравлического сопротивления  $\lambda_0$  в зависимости от числа Рейнольдса. Известная универсальная формула Прандтля-Никурадзе, которая применяется во всей области турбулентного движения течения, в данных исследованиях аппроксимировали с достаточной точностью (коэффициент детерминации 0,9919) функцией степени

$$\lambda_0 = 0,4611 \cdot \text{Re}^{-0,2918}. \quad (3.75)$$

Результаты проведенного анализа гидродинамических параметров СОСН использовали при построении математической модели движения жидкости в

системе.

Расположение произвольного поперечного сечения трубопровода определялось пространственной координатой  $x$ , м, которая отсчитывается от начального пересечения трубопровода (у входа потока из резервуара в трубопровод), по потоку. Начальным моментом времени  $\tau = 0$ , с, считался момент касания ноги пожарной почвы (для периода ВР) или отрыва от нее (для периода СР).

Уравнение неразрывности жидкости в трубопроводе представлены в виде

$$\rho_B u_B s_1 = \rho_0 u_0 s_1 \text{ или } Q_{\text{ж}} = Q_0, \quad (3.76)$$

- где  $u_B$  – скорость жидкости в произвольном поперечном сечении потока трубопровода, м/с,  $u_B = u_B(x, \tau)$ ;  
 $u_0$  – скорость жидкости в начальном поперечном сечении потока, м/с,  $u_0 = u_0(0, \tau) = u_0(\tau)$ ;  
 $Q_{\text{ж}}$  – расход жидкости в произвольном поперечном сечении потока, м<sup>3</sup>/с,  $Q_{\text{ж}} = u s_1$ ;  
 $Q_0$  – расход жидкости в начальном поперечном перерезе потока, м<sup>3</sup>/с.

С учетом принятых предположений и допущений, движение жидкости по трубопроводу моделировали с помощью дифференциального уравнения

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_B u_B) + \frac{k_K}{2} \frac{\partial}{\partial x}(\rho_B u_B^2) = -\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda_0}{2\alpha_0} \rho_B u_B^2 - \rho_B g_x\right), \quad (3.77)$$

- где  $k_K$  – коэффициент Кориолиса, который характеризует поправку на неравномерность распределения скорости в поперечном сечении  $s$  потока, с периметром  $\Omega = \pi d_0$ , м;  
 $\alpha_0$  – гидравлический диаметр ( $\alpha_0 = 4s_1 / \Omega$ ), м;  
 $p$  – давление, Па  $p = p(x, \tau)$ ;  
 $g_x$  – проекция вектора ускорения силы веса на направление потока, в период ВР:  $g_x = -g$ , в период СР  $g_x = g$ .

Предусматривали, что в начале периода шага скорость потока жидкости в начальном пересечении равняется нулю (потек отсутствующий), что математически формулировали начальным условием

$$u(0,0) = u_0(0) = 0. \quad (3.78)$$

Давление в трубопроводе отсчитывали от уровня атмосферного, поэтому в конце трубопровода, после входа потока в резервуар (холодильник или компрессор)  $p(l_1, \tau) = 0$ .

В результате интегрирования (3.77) по длине трубопровода  $l_1 \approx H$  с учетом уравнения неразрывности (3.76) получена следующая зависимость расхода

жидкости в трубопроводе от влияющих внешних и внутренних сил:

$$\frac{d\bar{Q}}{d\bar{\tau}} = \bar{k} + \bar{p}_0 - \bar{\lambda}\bar{Q}^2 + \bar{g}\text{Fr}, \quad (3.79)$$

где  $\bar{\tau}, \bar{Q}$  – безразмерные переменные  $\bar{\tau} = (\tau Q^*) / (l_1 \cdot s_1)$ ,  $\bar{Q} = Q_{\text{ж}} / Q^*$ ;

$\bar{k}$  – коэффициент неравномерности распределения скорости в поперечном сечении потока  $\bar{k} = k_1 / 2$ ;

$\bar{p}$  – относительная величина давления на концах трубопровода  $\bar{p}_0 = p_0 s_1^2 / (\rho_0 Q^{*2})$ ;

$p_0$  – разница давления на концах трубопровода;  $p_0 = \tilde{p}_0 - \rho_0 g \hat{H}$  в период ВР,  $p_0 = \hat{p}_0 = \rho_0 g(\hat{h} + \hat{H}) \approx \rho_0 g \hat{H}$  в период СР;

$\bar{\lambda}$  – коэффициент гидравлического сопротивления  $\bar{\lambda} = \lambda_0 l_1 / (2d_0)$ ;

$\text{Fr}$  – число Фруда, которое характеризует соотношение между пьезометрическим напором и кинетической энергией потока  $\text{Fr} = g H s_1^2 / Q^{*2}$ ;

$\bar{g}, Q^*$  – расход при характерной скорости  $\bar{g} = g_x / g$ ;

$Q^* = u^* s_1$  или  $Q^* = U^* s_1$ .

Краевое условие (3.78) в безразмерных переменных приводится к

$$\bar{Q}(0) = 0.$$

Таким образом, движение потока жидкости в трубопроводе моделируется уравнением (3.79) с краевым условием (3.80). При этом входящая в (3.79) величина относительного расхода жидкости зависит только от времени, а коэффициент сопротивления  $\bar{\lambda}$  является функцией числа Рейнольдса.

Решение (3.79), полученное численным методом Рунге-Кутты, сравнивали с аналитическим:

$$\bar{Q} = C_1 \cdot \text{th}(\bar{\lambda}^* \cdot \bar{\tau}) + C_0, \quad (3.80)$$

где  $C_1, C_0$  – относительная величина начального расхода жидкости

$$C_1 = \sqrt{(\bar{k} + \bar{p}_0 + \text{Fr}) / \bar{\lambda}^*}; \quad C_0 = Q_0 / Q^*.$$

Решение уравнения (3.80) определено при постоянных значениях  $\bar{\lambda}^*$ , которые отвечают скоростям  $U^* / 2$  или  $u^* / 2$ .

В итоге получено, что в реальном диапазоне изменения диаметра трубопровода (5...10) мм расхождение между численным и аналитическим решением не превышает 5 %. Моделирования прекращали, как только расход жидкости, который прошел по трубопроводу, достигал значения объема жидкости в ком-

прессоре. Таким образом, определяли длительность периодов ВР и СР.

Исследования показали, что наиболее существенным фактором, который влияет на скорость истечения жидкости из компрессора или холодильника, является диаметр трубопровода. В меру увеличения диаметра время истечения сокращается, при этом длительность периода СР приближается к длительности периода ВР (рис. 3.25).

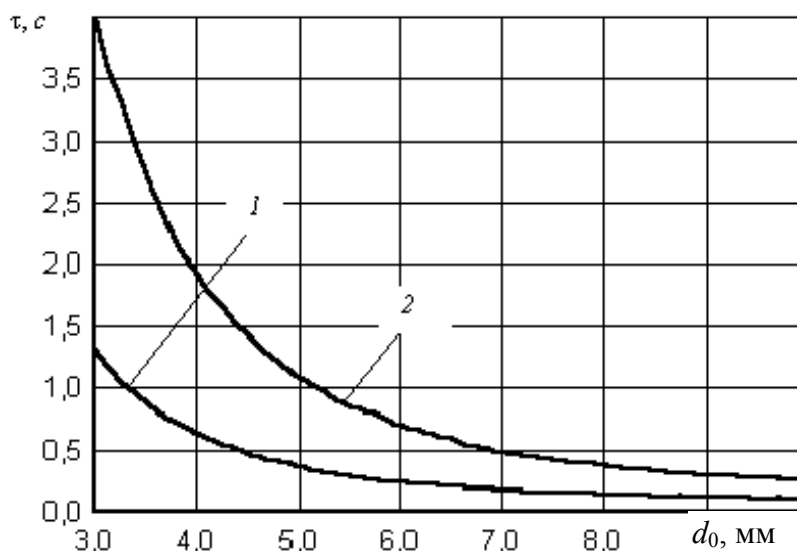


Рис. 3.25. Зависимость времени вытекания жидкости от диаметра трубопровода:  
1 – с компрессора; 2 – с холодильника

Динамику жидкости в период СР определяли при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а для периода ВР были проведены расчеты длительности опустошения компрессора в диапазоне температуры  $0...40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . С повышением температуры проводимость трубопровода улучшается, однако изменения времени опустошения от значения при стандартной температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  не превышают 6 %.

Построенная математическая модель и полученные результаты исследования динамики жидкости в трубопроводе СОСН использовались при разработке методики моделирования эффективности ее функционирования в зависимости от гидравлических, тепловых параметров и температуры окружающей среды с целью выбора оптимальной конструкции СОСН.

Учитывая широкий диапазон скоростей движения пожарных, о которых речь будет идти ниже, в отличие от горноспасателей, диаметр трубопровода избран равным  $8 \cdot 10^{-3}$  м.

При исследовании СОКР принимаем, что оболочка рукавицы (рис. 3.26) имеет многослойную структуру, аналогичную оболочке костюма.



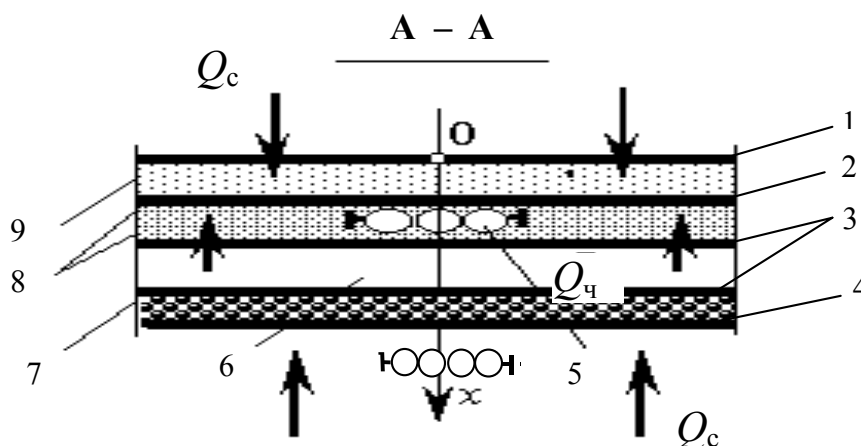


Рис. 3.26. Поперечный разрез А–А структуры рукавицы костюма: 1 – теплоотражающая, термостойкая ткань; 2 – прокладка сатиновая; 3 – рукавица внутренняя, тонкая, сатиновая; 4 – термостойкая ткань; 5 – охлаждающий элемент; 6 – воздушный зазор рукавицы для кисти руки; 7 – прокладка теплоизолирующая; 8 – ампула герметичная; 9 – объемный теплоизолирующий слой

Принцип работы СОКР заключается в следующем. В рукавицах, в прослойке находится вода, которая поглощает теплоту, которая проникает с внешней среды через внешнюю оболочку рукавицы и через внутреннюю оболочку от поверхности кистей рук. Объем прослойки рукавиц соединен по периметру запястья с воздушной прослойкой между рукавами внешней и внутренней оболочки костюмов. На внутренней поверхности оболочки защитного костюма (комбинированная ткань), вокруг предплечья и плеч расположены ОЭ-2 в решетчатых пластмассовых карманах. Причем наиболее важным объектом исследований является воздушная прослойка между внутренним костюмом и поверхностью тела человека. Эта прослойка также называется подкостюмным пространством. Температура внутри этого пространства является главным критерием защитных свойств костюма.

Для охлаждения воды необходимо переместить воду, которая нагрелась, из рукавиц у рукава, поднимая руки или сгибая их в локтях, а потом опять заполнить водой рукавицы, опуская руки.

Считается, что за время движения кисти вверх или вниз, вода успевает вытечь из рукавицы или рукава, а изменение положения кистей рук может происходить после некоторой паузы. Тогда цикл движения – период времени с момента начала истекания воды с рукавицы до момента полного истекания воды из рукава.

Задача заключается в определении периодичности движений рук пожарного  $\tau_p$ , мин, массы ОЭ-2, необходимой для охлаждения кистей рук в течение

времени защитного действия костюма и расхода льда,  $m_{\text{л}}$ , кг, которые определяется по формулам

$$\tau_p = \frac{c_B m_B}{60 P_0} (t_B - t_A), \quad m_{\text{л}} = \frac{P_0 \tau_k}{h_p - h_{\text{л}}} \quad (3.81)$$

где  $c_B$  — теплоемкость воды, кДж/ (кг·К);

$m_B$  — масса воды в рукавице, кг;

$t_A, t_B$  — начальная и конечная температура в рукавице, °С;

$P_0$  — мощность охлаждения, Вт.

---

$\tau_k$  — время защитного действия костюма, с;

$h_p$  — энтальпия воды в ОЭ-2 рукава в момент окончания времени защитного действия костюма, Дж/кг;

$h_{\text{л}}$  — энтальпия льда, Дж/кг.

Исследования показали, что при температуре окружающей среды  $t_c = 150$  °С, проникающем тепловом потоке  $Q_c = (8...12)$  Вт и начальной температуре воды  $t_A = (20...25)$  °С, масса воды в рукавице должна быть не менее 0,1 кг, а движение рук должно выполняться в период до 300 с (5 мин).

Эффективность функционирования СМО характеризуется количеством теплоты воды, которая нагрелась, а СМО поглощает за один цикл движения воды. Этот показатель зависит от времени пребывания воды в СМО и динамику температуры в оболочке костюма и подкостюмном пространстве. Полученные результаты теоретических исследований подтверждены данными экспериментов для костюма ПТК-80, которые приведены ниже.

3.3.5. Моделирование динамики температуры в системах местного охлаждения одежды после предыдущего замораживания циркулирующей в них воды

Главным недостатком систем местного охлаждения является то, что циркулирующая в них вода частично или полностью охлаждается за счет хладагента костюма. Поэтому исследуем возможность снижения влияния этого фактора на период его функционирования в целом и увеличения периода за счет предыдущего замораживания в СМО воды, а, следовательно, увеличение длительности работы в одежде.

В дальнейшем рассматривается СОКР, потому что теплота воды в ней поглощается только хладагентом костюма. Предусматривается, что полученные результаты равной мерой могут быть использованы для СОСН.

Для увеличения запаса холода в рукавице с тыльной стороны руки вода заменяется льдом (вода в стельке СОСН замораживается в полном объеме). Для получения льда рекомендуется использовать подобные основным охлаждающим элементам водоледяной системы охлаждения костюма пакеты полиэтиленовых цилиндрических ампул меньших размеров ОЭ (МОЭ). До их крепления

внутри рукавицы ампулы МОЭ разгерметизируют (надрезают), а лед можно дробить.

Предусматривается, что благодаря наличию льда СОКР начнет функционировать, а поэтому процессы охлаждения МОЭ и ОЕ-2 ничем не отличаются.

При математическом моделировании температура  $T = T(x)$ , К, в оболочке рукавицы, где располагаются предварительно замороженные МОЭ, рассматривается в зависимости от времени  $\tau$ , и расстояния  $x$ , м, от внешней поверхности по нормали (см. рис. 3.26). Учитывается, что оболочка состоит из четырех частей: внешнего слоя, толщиной  $\delta_n$ , м; воздушной, водяной или ледяной прослойки, толщиной  $\delta_l$ , м; внутреннего слоя, толщиной  $\delta_b$ , м, и воздушной прослойки пододежного пространства, толщиной  $\delta_{\Pi}$ , м.

Пространственная координата оболочки  $x$ , м, отсчитывается от внешней поверхности по нормали в сторону внутренней поверхности. В качестве начала системы координат избрана срединная поверхность МОЭ. При этом внешняя поверхность оболочки имеет координату  $x_n = -(\delta_n + \delta_l/2)$ , а внутренняя  $x_b = \delta_b + \delta_l/2$ . Границы МОЭ:  $x_b = \delta_b + \delta_l/2$  и  $x_{эв} = \delta_l/2$ .

Поверхность тела человека задана координатой  $x_{\Pi} = \delta_b + \delta_l/2 + \delta_{\Pi}$ .

С учетом принятых допущений динамика температуры по толщине МОЭ моделируется уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3.82)$$

где  $a$  — температуропроводность оболочки костюма,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $a = a(x, \tau)$ ,

Принято, что к началу применения защитного костюма температура оболочки и в пододежном пространстве везде одинаковая и принимает некоторую величину  $T_k$ , К:

$$T = T_k, \quad x_n \leq x \leq x_{эв}; \quad x_{эв} \leq x < x_{\Pi}, \quad (3.83)$$

а температура ОЭ-2 равняется  $T_0$ , К:

$$T = T_0, \quad x_{эв} \leq x \leq x_{\Pi}. \quad (3.84)$$

В период применения костюма температура в его внешней поверхности равняется температуре окружающей среды  $T_c$ , К:

$$T(x_n - \varepsilon_1, \tau) = T_c, \quad (3.85)$$

где  $\varepsilon_1$  — бесконечно малое положительное число.

Теплообмен на внешней и внутренней поверхностях моделируется в со-

ответствии с законом Ньютона в виде предельных условий третьего рода:

$$\lambda_n \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_n [T(0, \tau) - T_c], \quad (3.86)$$

$$\lambda_b \frac{\partial T(x_b, \tau)}{\partial x} = \alpha_b [T(x_b, \tau) - T(x_b + \varepsilon_1, \tau)], \quad (3.87)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность слоя (прослойке) оболочки, Вт/(м · К),  $\lambda = \lambda(x)$ , которая зависит от теплофизических свойств слоев и прослоек оболочки;  
 "н", – индексы указывают на значение физической переменной соответственно для внешней и внутренней поверхностей оболочки;  
 $\alpha$  – коэффициент конвективно-лучистого теплообмена между слоем и внешней средой или подкостюмным пространством Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Считаем, что температуры и плотности тепловых потоков, на границах МОЭ со слоями сбегаятся, что отвечает условию неразрывности температурного поля и предельному условию четвертого рода для плотности тепловых потоков по закону теплопередачи Фурье:

$$T(x_{эн} - \varepsilon_1, \tau) = T(x_{эн} + \varepsilon_1, \tau); \quad T(x_{эв} - \varepsilon_1, \tau) = T(x_{эв} + \varepsilon_1, \tau); \quad (3.88)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T(x_{эн} - \varepsilon_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_э \frac{\partial T(x_{эн} + \varepsilon_1, \tau)}{\partial x}; \quad \lambda_э \frac{\partial T(x_{эв} - \varepsilon_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_b \frac{\partial T(x_{эв} + \varepsilon_1, \tau)}{\partial x}, \quad (3.89)$$

где индексы "н", "э" и "в" указывают на теплопроводность внешней оболочки, МОЭ и внутренней оболочки соответственно.

Таким образом, для моделирования динамики температуры в оболочке рукавицы костюма после предыдущего замораживания МОЭ построена математическая модель, представленная дифференциальным уравнением (3.82), начальными условиями (3.83), (3.44) и предельными условиями (3.45)-(3.89).

Для проведения дальнейших исследований уравнения (3.82) и краевые условия записываются в безразмерных переменных

$$\xi = x / \delta_k; \quad Fo = \tau \cdot a / \delta_k^2; \quad t = T / T_c. \quad (3.90)$$

В итоге задача сводится к дифференциальному уравнению:

$$\frac{\partial t}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2}, \quad (3.91)$$

$$t(\xi, 0) = t_0, \quad -1/2 \leq \xi \leq 1/2; \quad t(\xi, 0) = t_k, \quad \xi_h \leq \xi \leq -1/2; \quad 1/2 \leq \xi < \xi_q; \quad (3.92)$$

$$t(\xi_h - \varepsilon_1, Fo) = 1; \quad (3.93)$$

$$\frac{\partial t(0, Fo)}{\partial \xi} = Nu_h [t(0, Fo) - 1]; \quad \frac{\partial t(\xi_B, Fo)}{\partial \xi} = Nu_B [T(\xi_B, Fo) - T(\xi_B + \varepsilon_1, Fo)]; \quad (3.94)$$

$$t(-1/2 - \varepsilon_1, Fo) = t(-1/2 + \varepsilon_1, Fo); \quad t(1/2 - \varepsilon_1, Fo) = t(1/2 + \varepsilon_1, Fo); \quad (3.95)$$

$$\bar{\lambda}_h \frac{\partial t(-1/2 - \varepsilon_1, Fo)}{\partial \xi} = \frac{\partial t(-1/2 + \varepsilon_1, Fo)}{\partial \xi}; \quad \bar{\lambda}_B \frac{\partial t(1/2 - \varepsilon_1, Fo)}{\partial \xi} = \frac{\partial t(1/2 + \varepsilon_1, Fo)}{\partial \xi}, \quad (3.96)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта.

Уравнение (3.91) с краевыми условиями (3.92-3.96) решали численным методом по явной схеме. Расчетная сетка представлена узлами  $i = i_h \dots i_q$ , полученными путем условного деления оболочки на слои, с шагом  $\Delta \xi = 0,1$ . Числа Фурье и Нуссельта заменяли сеточными аналогами  $Fl = a\Delta Fo / \Delta \xi^2$ ;  $N1 = \alpha \Delta \xi / \lambda$ . Устойчивость расчетной схемы обеспечивалась выполнением условия  $\beta = \alpha \Delta Fo / \Delta \xi^2 = 1/6$  за счет соответствующего выбора шага  $\Delta Fo$ . При расчетах использовался 4-точечный шаблон вида

$$t_i^{n+1} = \frac{1}{6}(t_{i+1}^n + 4 \cdot t_i^n + t_{i-1}^n), \quad (3.97)$$

где  $n$  – шаг по времени.

Варианты моделирования динамики температуры в отдельных слоях оболочки и по всей ее толщине представлены на рис. 3.27 и 3.28.

Полученная числовая модель позволяет исследовать динамику температуры во внешнем и внутреннем слоях оболочки рукавицы, в обуви, а также температуры МОЭ и в пододежном пространстве в зависимости от температуры окружающей среды, теплофизических параметров материала оболочки и МОЭ.

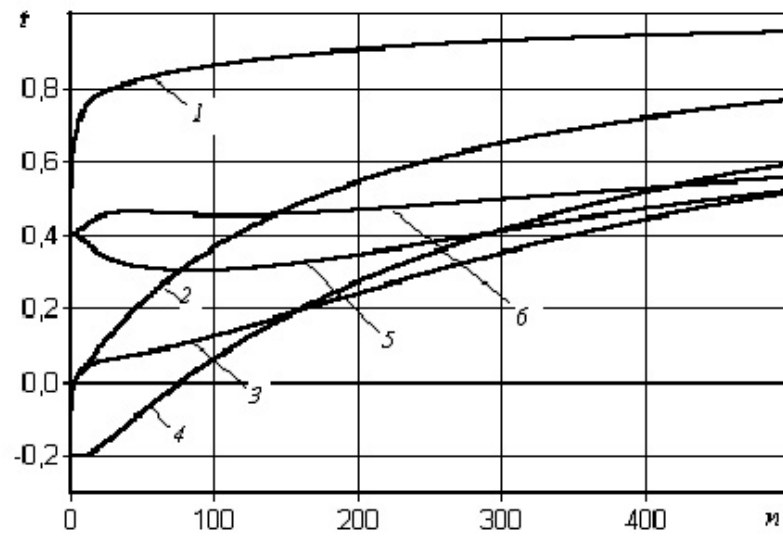


Рис. 3.27. Динамика температуры в разных слоях оболочки костюма при таянии льда в системе местного охлаждения: 1 – внешняя поверхность костюма; 2 – внешняя поверхность костюма МОЭ; 3 – срединная поверхность костюма МОЭ; 4 – внутренняя поверхность костюма МОЭ; 5 – внутренняя поверхность оболочки костюма; 6 – срединная поверхность подкостюмного пространства

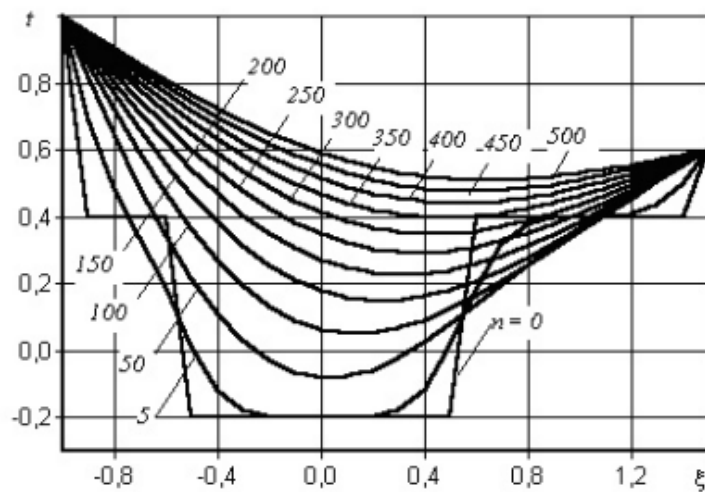


Рис. 3.28. Динамика температуры по толщине оболочки костюма в системе местного охлаждения

### 3.3.6. Исследование процесса теплообмена в противотепловой куртке

Если в качестве ПТО служит противотепловая куртка, то в этом случае распределение тепловых потоков и соотношение необходимого теплосъема будут иными. Определим эти параметры для противотепловой куртки, в которой усиленной теплоизоляцией ( $M = 2clo$  или  $0,31(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ ) и системой охлаждения снабжены только наиболее уязвимые части тела – голова и туловище человека. Ноги и руки имеют теплоизоляцию, соответствующую спецодежде горноспасателя ( $M = 1clo$  или  $0,155(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ ). Тепловые потоки для куртки при температуре ( $t$ ) окружающей среды 40 и 50 °С рассчитаны на ПЭВМ по программе «Баланс-1» и приведены в таблице 3.2, где, как и ранее:  $Q_c$ ,  $Q_n$ ,  $Q_{ch}$  – конвективный тепловой поток, проникающий из окружающей среды во внутрь куртки, тепловой поток излучением, энергозатраты человека, соответственно, Вт.

На основании уравнения тепловых потоков можно рассчитать необходимую холодопроизводительность системы охлаждения куртки ( $Q_x$ , Вт) и необходимый запас хладагента [6]

$$Q_x = Q_c + Q_n + Q_{ch}, \quad (3.98)$$

В соответствии с данными таблицы (3.2) и уравнением (3.98), получаем для температуры окружающей среды 40 °С  $Q_x = 313,5$  Вт, а для 50 °С  $Q_x = 434,9$  Вт.

Таблица 3.2

Параметры теплообмена в противотепловой куртке

$t$ , °С	Часть тела	$Q_c$ , Вт	$Q_n$ , Вт	$Q_{ch}$ , Вт	$Q_c + Q_n + Q_{ch}$	
					Вт	%
40	Ноги	14,2	7,7	76,8	98,7	31,5
«	Руки	10,3	5,4	51,2	66,9	21,3
«	Голова+тулов.	11,9	8,0	128,0	147,9	47,2
«	Сумма:	36,4	21,1	256,0	313,5	100
50	Ноги	42,7	24,2	76,8	143,7	33,0
«	Руки	31,0	17,2	51,2	102,4	23,6
«	Голова+тулов.	35,7	25,1	128,0	188,8	43,4
«	Сумма:	109,4	66,5	259,0	434,9	100

Для расчета необходимого запаса хладагента (льда), используем формулу

$$m_{\text{л}} = 60 \tau_{\text{к}} Q_x / q_{\text{л}}, \quad (3.99)$$

где  $\tau_{\text{к}}$  – время работы в противотепловой куртке, мин;  
 $q_{\text{л}}$  – удельный запас холода водяного льда, Дж/кг.

Принимаем время работы в куртке при 40 °С равным 44 мин, при 50 °С – 16 мин и получаем по (3.99) необходимый запас льда для этих температур, соответственно, 2,0 кг и 1,1 кг. С учетом некоторого резерва следует принять запас льда равным 2,3 кг.

Расчет соотношения необходимого теплосъема для противотепловой куртки в области головы и туловища проведен пропорциональным пересчетом данных таблицы 3.2. В результате доля необходимого теплосъема с головы составляет 30 %, а с туловища – 70 %.

Результаты расчета будут использованы для рационального распределения системы теплосъема при разработке новых видов ПТО.

### 3.3.7. Теплообменные процессы в системе «окружающая среда – охлаждающий жилет – человек»

В условиях повышенных температур (до 40 °С) наиболее целесообразным с точки зрения минимальной массы и большего времени защитного действия по сравнению со спецодеждой является применение противотеплового жилета с системой охлаждения, основанной на использовании водоледяных охлаждающих элементов ОЭ-2, расположенных на внутренней поверхности оболочки жилета в решетчатых пластмассовых карманах (см. рис. 3.5).

Результаты расчета теплового баланса в противотепловой куртке в этом случае не могут быть использованы для противотеплового жилета, так как в нем охлаждается только туловище человека.

Поэтому для дальнейших исследований теплообмена в системе «окружающая среда – охлаждающий жилет – человек» необходимо знать площади поверхностей отдельных частей тела ( $S_i$ ), которые определим по данным антропометрических измерений в виде относительных величин ( $\delta_i$ ) и приведены в табл. 3.3 [5,18].

При расчете за исходную величину принята общая площадь поверхности тела, равная 1,8 м<sup>2</sup> для среднестатистического человека мужского пола. В соответствии с этими данными доля поверхности тела, включающая голову, руки и ноги, составляет 60 % или  $\delta_1 = 0,6$  при площади –  $S_1 = 1,08$  м<sup>2</sup>, а для туловища – 40 %,  $\delta_2 = 0,4$ ,  $S_2 = 0,72$  м<sup>2</sup>.

Таблица 3.3

Площадь поверхности частей тела человека

Часть тела	$\delta_i$ , %		$S_i$ , м <sup>2</sup>	
Голова	$\delta_1 = \sum_{i=1}^3$	7	$S_2 = \sum_{i=1}^3$	0,126
Руки		22		0,396
Ноги		31		0,558
Туловище	$\delta_2 = 40$		$S_2 = 0,720$	



Для исследований теплообмена суммарной части тела, включающей голову, руки и ноги, составим уравнение теплового баланса, в котором индекс «1» показывает, что соответствующие величины тепловых потоков  $Q_1$ , Вт, относятся именно к этой суммарной части тела:

$$Q_{S1} = \delta_1(Q_C + Q_R + Q_{EM}) + Q_{T1}, \quad (3.100)$$

где  $Q_{S1}$  – суммарный тепловой поток;

$Q_{T1}$  – теплопродукция организма человека, относящаяся к указанным выше частям тела.

Величину  $Q_{T1}$  можно записать в виде

$$Q_{T1} = \delta_1 Q_M (1 - \mu), \quad (3.101)$$

где  $Q_M$  – общие энергозатраты всего организма, Вт;

Формулу (3.100) можно записать в следующем виде:

$$Q_{S1} = Q_{C1} + Q_{R1} + Q_{EM1} + Q_{T1}. \quad (3.102)$$

В формулах (3.100) и (3.102) фигурирует максимально возможный теплоотвод испарением пота  $Q_{EM1}$ , который правомерен в том случае, если в организме происходит накопление теплоты, и он не в состоянии отвести ее излишек даже при максимальном теплоотводе путем испарения пота. В то же время возможны ситуации, когда при определенных параметрах микроклимата и энергозатрат организм путем собственной терморегуляции обеспечивает нулевое теплоснакопление, т.е. организм не охлаждается и не нагревается. При этом терморегуляция происходит, в основном, путем теплоотвода испарением пота, который поддерживается на уровне, обеспечивающем нулевое теплоснакопление в организме. В данном случае расчет необходимого (но не максимального  $Q_{EM1}$ ) теплоотвода путем испарения пота ( $Q_{E1}$ , Вт) проводится с учетом формулы (3.102) при условии  $Q_{S1} = 0$ , то есть

$$Q_{E1} = -(Q_{C1} + Q_{R1} + Q_{T1}). \quad (3.103)$$

Если  $Q_{E1} \leq Q_{EM1}$ , то тепловое состояние организма можно выразить показателем теплового напряжения организма  $W$  в относительных единицах:

$$W = Q_{E1} / Q_{EM1}. \quad (3.104)$$

Как следует из определения, показатель  $W$  не может превышать единицу. Результаты расчета показателей по формулам (3.102-3.104) с использованием составленной компьютерной программы «Баланс» приведены в табл. 3.4.

При расчете по этой программе потоки, отводящие теплоту от организма, имеют знак минус, а подводящие – знак плюс.

Таблица 3.4

## Показатели теплообмена для суммарной части тела

Исходные данные		Расчетные данные						
$t_c, ^\circ\text{C}$	$B, \%$	$Q_{C1}, \text{Вт}$	$Q_{R1}, \text{Вт}$	$Q_{EM1}, \text{Вт}$	$Q_{E1}, \text{Вт}$	$Q_{T1}, \text{Вт}$	$Q_{S1}, \text{Вт}$	$W$
30	80	-36,2	-18,4	-184,0	-99,0	153,6	0,0	0,54
	90	-36,2	-18,4	-148,4	-99,0	153,6	0,0	0,67
	95	-36,2	-18,4	-131,0	-99,0	153,6	0,0	0,75
32	80	-21,7	-11,2	-149,7	-120,7	153,6	0,0	0,81
	90	-21,7	-11,2	-110,0	–	153,6	10,7	–
	95	-21,7	-11,2	-89,9	–	153,6	30,8	–
35	80	0,0	0,0	-91,5	–	153,6	62,4	–
	90	0,0	0,0	-45,6	–	153,6	108,0	–
	95	0,0	0,0	-21,6	–	153,6	132,0	–

При этом приняты следующие исходные данные: термическое сопротивление одежды  $M = 0,5 \text{ clo}$  ( $0,08 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ ); температура окружающего воздуха ( $t_c$ ) 30, 32 и 35  $^\circ\text{C}$ ; относительная влажность окружающего воздуха ( $B$ ) 80, 90 и 95 %; энергозатраты человека  $Q_M = 320 \text{ Вт}$ ; скорость движения воздуха  $v = 2 \text{ м/с}$ ; рост человека  $h_q = 170 \text{ см}$  и его масса  $m_q = 70 \text{ кг}$ ; средневзвешенная температура кожи 35  $^\circ\text{C}$ , а поэтому при  $t_c = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  (при отсутствии перепада температур между окружающим воздухом и поверхностью кожи)  $Q_{C1} = Q_{R1} = 0$ .

Далее проводим аналогичный расчет теплообмена туловища с использованием формул (3.48) и (3.50), в которых индекс «1» изменен на индекс «2» (табл. 3.5). Для расчета показателей теплообмена приняты те же исходные данные, что и для расчета показателей, приведенных в табл. 3.2. Отличие состоит только в том, что для туловища тепловое сопротивление одежды (жилета) принято  $M = 2,0 \text{ clo} = 0,31 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ .

Сводные данные по теплонакоплению организма (см. табл. 3.3 и 3.4) приведены в табл. 3.6, где его суммарная величина

$$Q_S = Q_{S1} + Q_{S2}.$$

Аналогично (3.99), используя полученные данные, определим массу водяного льда, необходимую для отвода поступающей в организм человека теплоты, и количество охлаждающих элементов ОЭ-2 соответственно

$$m_{\text{л}} = 60 Q_S \tau_{\text{ж}} / q_{\text{л}}, \quad n_{\text{ОЭ}} = m_{\text{л}} / m_{\text{ОЭ}}, \quad (3.105)$$

Таблица 3.5

## Показатели теплообмена туловища

Исходные данные		Расчетные данные				
$t_c, ^\circ\text{C}$	$B, \%$	$Q_{C2}, \text{Вт}$	$Q_{R2}, \text{Вт}$	$Q_{EM2}, \text{Вт}$	$Q_{T2}, \text{Вт}$	$Q_{S2}, \text{Вт}$
30	80	-9,4	-6,5	-48,8	102,4	37,7
	90	-9,4	-6,5	-39,4	102,4	47,1
	95	-9,4	-6,5	-34,7	102,4	51,8
32	80	-5,6	-3,9	-39,7	102,4	53,2
	90	-5,6	-3,9	-29,2	102,4	63,7
	95	-5,6	-3,9	-23,8	102,4	69,1
35	80	0,0	0,0	-24,3	102,4	78,1
	90	0,0	0,0	-12,3	102,4	90,1
	95	0,0	0,0	-5,7	102,4	96,7

Таблица 3.6

## Сводные данные по теплонакоплению организма

Исходные данные		Расчетные данные		
$t_c, ^\circ\text{C}$	$B, \%$	$Q_{S1}, \text{Вт}$	$Q_{S2}, \text{Вт}$	$Q_S, \text{Вт}$
30	80	0,0	37,7	37,7
	90	0,0	47,1	47,1
	95	0,0	51,8	51,8
32	80	0,0	53,2	53,2
	90	10,7	63,7	74,4
	95	30,8	69,1	99,9
35	80	62,1	78,1	140,2
	90	108,0	90,1	198,1
	95	132,0	96,7	228,7

где  $\tau_{\text{ж}}$  – время защитного действия жилета, мин;

$m_{\text{ОЭ-2}}$  – масса ОЭ-2, кг.

Выберем наиболее часто встречающийся диапазон микроклиматических условий в выработках шахт, превышающих нормы ПБ, на которые следует ориентироваться при дальнейших расчетах. Так, например, при температуре шахтного воздуха  $32^\circ\text{C}$  и его относительной влажности 95%  $Q_S = 99,9 \text{ Вт}$ , а при температуре  $35^\circ\text{C}$  и влажности 80%  $Q_S = 140,2 \text{ Вт}$  (см. табл. 3.6). Возьмем среднее между ними значение и примем для дальнейших расчетов  $Q_S = 120 \text{ Вт}$ , время охлаждающего действия жилета (время полного таяния льда в жилете до температуры  $20^\circ\text{C}$  при однократном снаряжении его ОЭ-2)  $\tau_{\text{ж}} = 120 \text{ мин}$ , при

этом удельный запас холода водяного льда за счет его теплоты плавления  $q_{\text{л}} = 335 \cdot 10^3$  Дж/кг.

Исходя из принятых исходных данных, получаем по формуле (3.53) необходимую массу водяного льда  $m_{\text{л}} = 2,6$  кг. В стандартном водолеяном элементе ОЭ-2 масса льда  $m_{\text{ОЭ}} = 0,173$  кг. Следовательно, для однократного снаряжения жилета необходимое количество ОЭ-2  $n_{\text{ОЭ}} = 15$  шт. В данном случае при переснаряжении жилета охлаждающими элементами через каждые 120 мин и при 6-часовой рабочей смене контейнер вместимостью 60 шт ОЭ-2 обеспечит работу одного горнорабочего с запасом 15 ОЭ-2, которые можно использовать для экстренного охлаждения пострадавших при перегревании организма и механических травмах, а при более тяжелых условиях – полностью в течение смены.

Проанализируем зависимость допустимой продолжительности работы (ДПР) горнорабочего в спецодежде (без охлаждения) и в спецодежде с охлаждающим жилетом от различных факторов.

Последующие расчеты соответствующих зависимостей и полученные по ним результаты основаны на следующих тепловых балансах горнорабочего при заданных параметрах микроклимата и физической нагрузки: при работе в спецодежде

$$Q_S = Q_C + Q_R + Q_{EM} + Q_M(1 - \mu) + Q_D, \quad (3.106)$$

при работе в охлаждающем жилете

$$Q_S = Q_C + Q_R + Q_{EM} + Q_M(1 - \mu) + Q_D - Q_X, \quad (3.107)$$

где  $Q_S$  – суммарный тепловой поток, нагревающий или охлаждающий тело человека, Вт;

$Q_D$  – теплообмен дыханием;

$Q_X$  – теплоотвод системой охлаждения жилета.

В соответствии с физиологическими нормами ДПР ограничивается допустимым приростом средней температуры тела человека, равным  $2^\circ\text{C}$ .

Для работы в спецодежде расчет проведен по составленной компьютерной программе BALANS1D, а для работы в жилете – по программе BALANS1DX.

Зависимость ДПР от температуры воздуха и от скорости его движения приведены на рис. 3.29, а от температуры воздуха и его относительной влажности – на рис. 3.30.

Поскольку ДПР в охлаждающем жилете рассчитано для однократного снаряжения его ОЭ-2, то оно ограничено временем полного таяния льда, равным 120 мин. Результаты исследований (см. рис. 3.29) показывают существенную эффективность охлаждающего жилета. Так, например, при температуре воздуха  $34^\circ\text{C}$  ДПР в спецодежде равна 42-44 мин, а в охлаждающем жилете – 100-110 мин, т.е. больше в 2,4-2,5 раза. При температуре  $35^\circ\text{C}$  ДПР в жилете больше в 1,9 раз.

Характерно, что при температуре воздуха 35 °С кривые пересекаются (как для спецодежды, так и для жилета). Это объясняется равенством в данной точке температуры воздуха и температуры поверхности кожи человека, а также тем, что относительная влажность окружающего воздуха и слоя воздуха над поверхностью кожи равна 100 %.

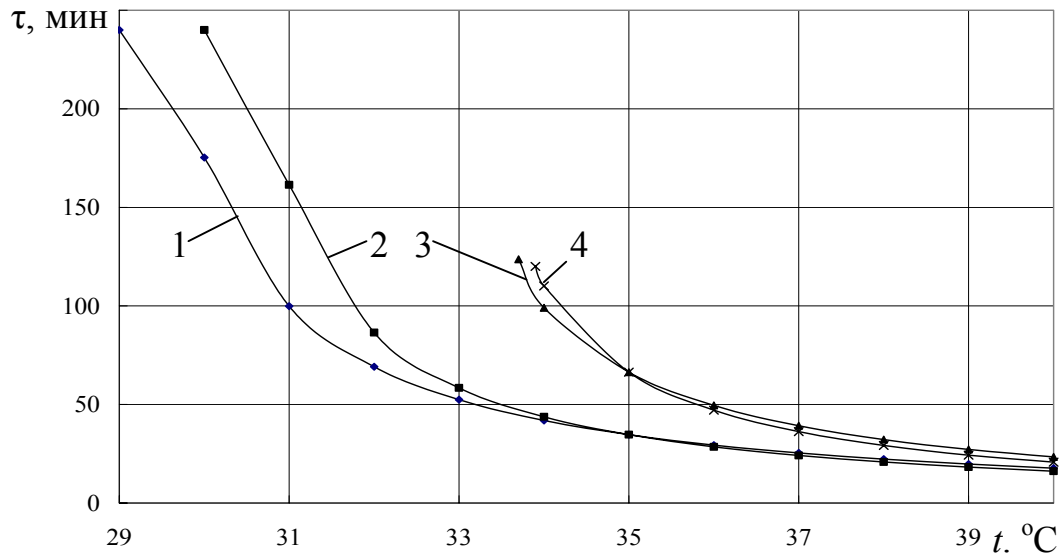


Рис. 3.29. Допустимая продолжительность работы горнорабочего в спецодежде и в охлаждающем жилете (одно оснащение ОЭ-2) при энергозатратах 320 Вт и относительной влажности воздуха 100 %:

1, 2 – в спецодежде при  $v = 1$  м/с и 5 м/с;

3, 4 – в охлаждающем жилете при  $v = 1$  м/с и 5 м/с

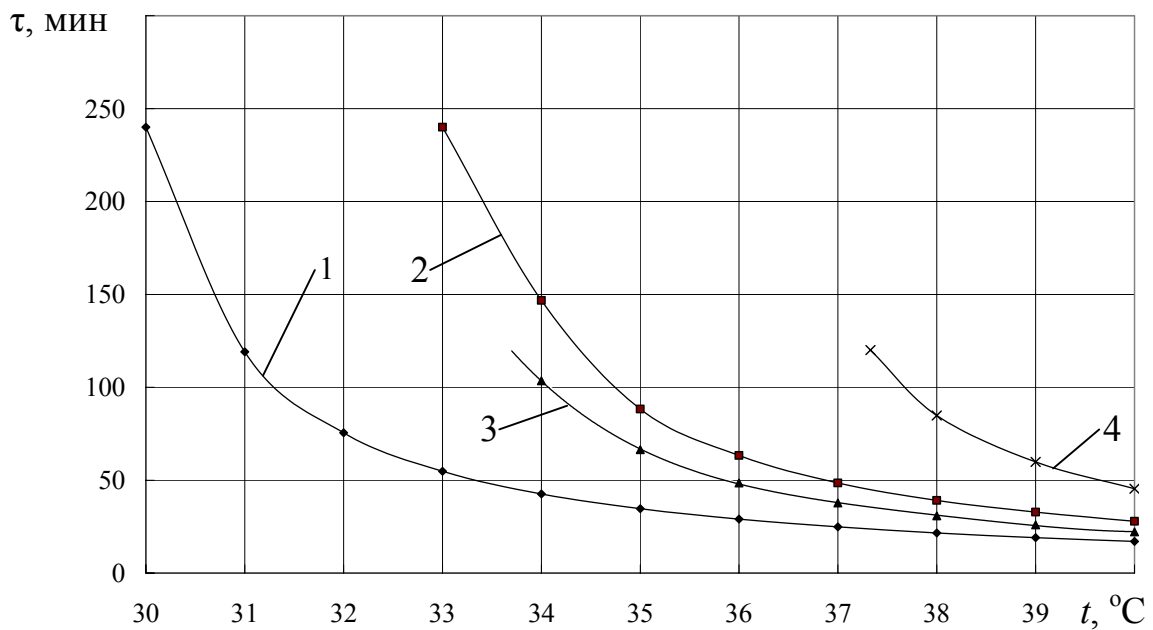


Рис. 3.30. Допустимая продолжительность работы горнорабочего в спецодежде и охлаждающем жилете (одно оснащение ОЭ-2) при энергозатратах 320 Вт и скорости движения воздуха 2 м/с:

1, 2 – в спецодежде при  $B = 100$  % и 75 %;

3, 4 – в охлаждающем жилете  $B = 100$  % и 75 %

Поэтому скорость движения воздуха в данной точке ( $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на теплообмен не влияет. Характерно также, что при температуре окружающего воздуха ниже  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  увеличение скорости его движения способствует увеличению отвода теплоты от организма человека и, соответственно, увеличению ДПР, а при температуре воздуха выше  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается обратная зависимость – при увеличении скорости движения воздуха увеличивается теплоприток к организму человека и вследствие этого уменьшается ДПР.

Зависимость ДПР от температуры воздуха и от физической нагрузки (от энергозатрат) на горнорабочего, работающего в спецодежде и в охлаждающем жилете, при относительной влажности окружающего воздуха 95 % и скорости его движения 2 м/с приведены на рис. 3.31 и 3.32.

При расчете зависимостей, приведенных на рис. 3.32, учтено следующее обстоятельство. При увеличении энергозатрат соответственно увеличивается теплопродукция организма человека. Поскольку тепловой поток (теплопродукция) от организма человека увеличивается, то более интенсивно тает лед в ОЭ-2 и, в определенной степени, увеличивается тепловой поток, поглощаемый ОЭ-2, одновременно уменьшается время полного таяния льда и этим определяется время защитного действия жилета при одном его оснащении ОЭ-2.

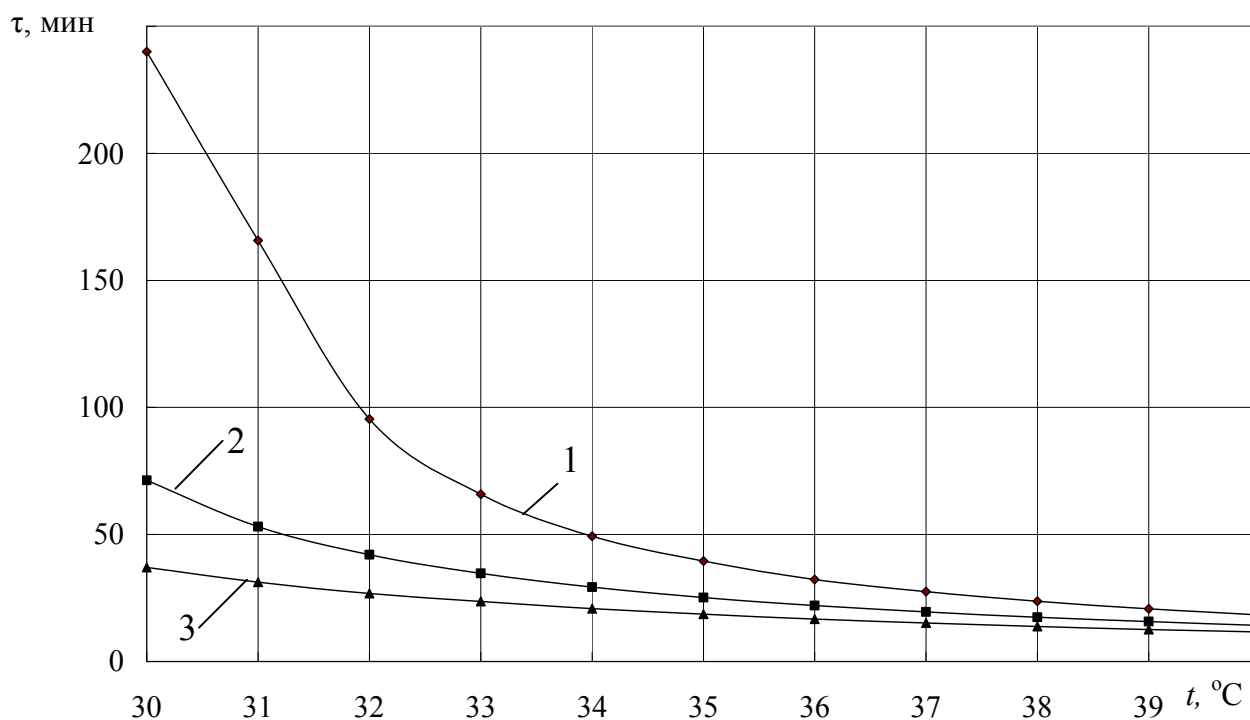


Рис. 3.31. Допустимая продолжительность работы горнорабочего в спецодежде без охлаждения в зависимости от энергозатрат:

1 – 320 Вт; 2 – 480 Вт; 3 – 640 Вт

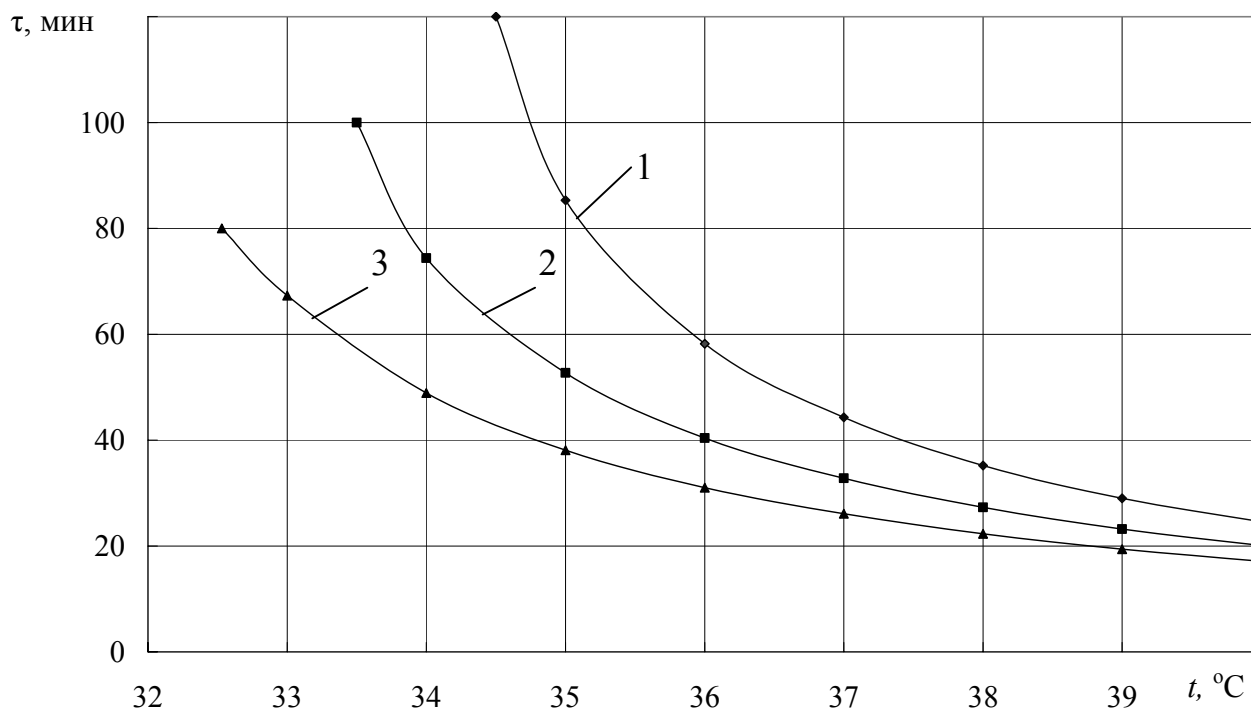


Рис. 3.32. Допустимая продолжительность работы горнорабочего в охлаждающем жилете (при однократном оснащении ОЭ-2) в зависимости от энергозатрат: 1 – 320 Вт; 2 – 480 Вт; 3 – 640 Вт

При расчете принято допущение, что тепловой поток ( $Q_X$ ), поглощаемый ОЭ-2, пропорционален теплопродукции организма человека, а время полного таяния льда ОЭ-2 обратно пропорционально ей.

Результаты показывают существенное влияние энергозатрат горнорабочего на допустимую продолжительность работы, причем при работе в охлаждающем жилете она, в основном, более чем в два раза выше, чем при работе в спецодежде.

В целом проведенные теоретические исследования показывают, что применение охлаждающих жилетов позволяет существенно увеличить допустимую продолжительность работы горнорабочих при эрготермической нагрузке, а, следовательно, повысить производительность труда, обеспечивая их безопасность.

### 3.3.8 Энергетическая нагрузка на горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ

Эффективность и безопасность ведения работ подразделениями ГВГСС или членами ВГК шахты в экстремальных микроклиматических условиях возможно обеспечить при оперативном использовании на командном пункте компьютерной программы «Термоэрг», предназначенной для определения продолжительности работы, основой которой является тепловой баланс системы «окружающая среда – защитная одежда – человек – энергозатраты».

Одной из основных составляющих теплового баланса (см. подразделы 3.1, 3.2), от которого зависит допустимая продолжительность работы подразделений при любых эрготермических нагрузках, является внутренняя энергия, вырабатываемая организмом человека при выполнении различного вида работ.

Эта энергия (энергозатраты) зависит от многих факторов: скорости передвижения, угла наклона и высоты выработки, массы переносимого груза. В то же время скорость передвижения подразделений зависит от состояния окружающей среды: пригодной или непригодной для дыхания атмосферы, видимости, задымленности и температуры. От того, насколько быстро будут учтены эти факторы, зависит оперативность использования программы «Термоэрг», с помощью которой определяется продолжительность работы горноспасателей и членов ВГК шахты, принятие правильного решения по выполнению ими задания, а, следовательно, жизнь и здоровье горнорабочих, материальный ущерб шахты.

В Уставе ГВГСС приведены пять таблиц по определению скорости передвижения отделений в пригодной, непригодной для дыхания атмосфере при полной видимости, поправочные коэффициенты в зависимости от средней нагрузки на респираторщика, пройденного расстояния, температуры воздуха и видимости в выработке, а также расход кислорода в не пригодной для дыхания атмосфере на 100 м пути в зависимости от выполняемой работы. Механический учет вышеприведенных факторов, особенно при больших количествах маршрутов передвижения подразделений и выполнении различного рода работ, снижает оперативность ведения аварийно-спасательных работ, а иногда приводит к принятию ошибочных решений на командном пункте. В связи с этим, необходимо установить зависимости энергозатрат членов подразделений от влияющих факторов при различных эрготермических нагрузках в виде уравнений с последующим автоматизированным учетом результатов в программе «Термоэрг».

Определим энергозатраты организма горноспасателей (членов ВГК) при движении с грузом.

Масса снаряжения (груза, переносимого членами аварийно-спасательных подразделений), оказывает большое влияние на их работоспособность и на энергозатраты организма. Для оценки этого влияния и ориентировочных эргономических расчетов необходимо установить математическую зависимость между массой переносимого снаряжения (груза) и энергозатратами при движении человека по горизонтальной поверхности.

Энергетические процессы в организме человека основаны на потреблении им кислорода, которое для исследуемого процесса можно представить в виде [19]

$$q_r = q_t + q_d, \quad (3.108)$$

где  $q_r$  – общее потребление кислорода человеком при ходьбе с грузом, л/мин;  
 $q_t$  – потребление кислорода человеком при ходьбе без груза, л/мин;  
 $q_d$  – дополнительное потребление кислорода человеком за счет переноса груза, л/мин.



Здесь имеется в виду, что ходьба с переносом груза и без груза происходит с одной и той же скоростью, в одном и том же месте.

Переходя к удельным величинам и используя выражение (3.108), получаем соответственно

$$q_{dy} = q_d / m_g, \quad q_{ty} / m_t \quad (3.109)$$

где  $q_{dy}, q_{ty}$  – удельное и дополнительное потребление кислорода человеком за счет груза, л/(мин·кг);

$m_g, m_t$  – масса груза и тела человека, кг.

Введем условную безразмерную величину  $\varphi_p$  – коэффициент потребления кислорода при переносе груза:

$$\varphi_p = q_{dy} / q_{ty}. \quad (3.110)$$

Коэффициент  $\varphi_1$  показывает, во сколько раз дополнительное потребление кислорода на 1 кг переносимого груза больше (или меньше), чем потребление кислорода на 1 кг тела человека при передвижении в том же темпе без груза. Используя формулы (3.108-3.110), выражение (3.111) примет вид

$$\varphi_p = m_t (q_r - q_t) / (q_t m_g). \quad (3.111)$$

Отсюда следует, что

$$q_r / q_t = (1 + \varphi_p m_g / m_t). \quad (3.112)$$

Поскольку энергозатраты человека эквивалентны и пропорциональны потреблению кислорода, то отношение величин потребления кислорода в выражении (3.112) правомерно заменить отношением соответствующих энергозатрат, Вт

$$Q_M / Q_f = (1 + \varphi_p m_g / m_t), \quad (3.113)$$

где  $Q_M, Q_f$  – энергозатраты человека при движении с грузом и без груза (фоновая нагрузка), Вт.

Отсюда следует, что

$$Q_M = Q_f (1 + m_g / m_t). \quad (3.114)$$

Соответственно

$$\varphi_p = m_t(Q_M - Q_f)/(Q_f m_g). \quad (3.115)$$

На основании полученных ранее экспериментальных данных рассчитан коэффициент потребления кислорода при перенесении груза, среднее значение которого  $\varphi_p = 2,3$  может быть использовано для последующих расчетов по приведенным выше формулам.

Дополнительная удельная мощность, развиваемая человеком на перенесение 1 кг груза  $P_m$ , Вт/кг, определяется выражением

$$P_m = (Q_M - Q_f)/m_g. \quad (3.116)$$

По формуле (3.114) рассчитаны энергозатраты человека в зависимости от массы переносимого груза при различной фоновой нагрузке  $Q_f$  при постоянных значениях  $\varphi_p = 2,3$ ,  $m_t = 70$  кг. Результаты расчета приведены на рис. 3.15.

Пример пользования результатами рис. 3.33.

Допустим, мы принимаем фоновую нагрузку  $Q_f = 200$  Вт, что соответствует энергозатратам при ходьбе без груза со скоростью примерно 2,7 км/ч, и отмечаем соответствующую точку на оси ординат. От этой точки (200 Вт) следуем по наклонной линии графика до пересечения с ординатой заданного значения переносимого при этом груза, например, 30 кг. Ордината этой точки показывает на правой оси значение энергозатрат при ходьбе с грузом  $Q_M = 400$  Вт.

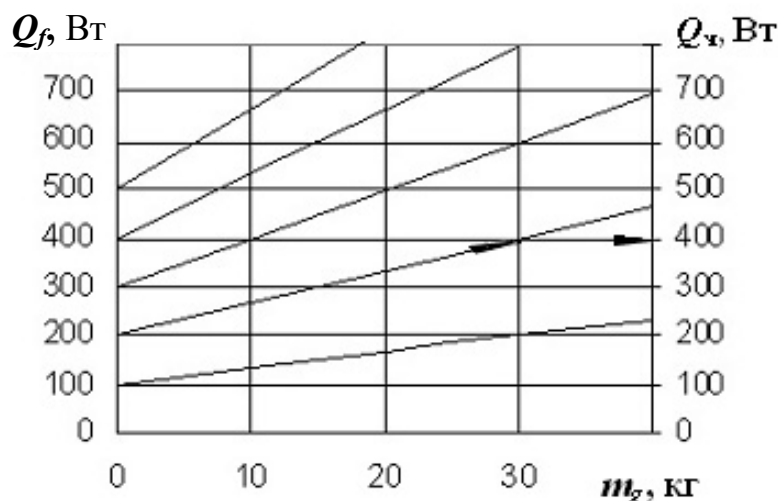


Рис. 3.33. Зависимость энергозатрат человека от массы переносимого груза при различной фоновой нагрузке

По формулам (3.114) и (3.116) рассчитаны данные, приведенные в табл. 3.6.

Для подтверждения результатов вышеприведенных зависимостей энергозатрат от массы переносимого груза, а также определения энергозатрат в зависимости от остальных параметров, для которых невозможно получить выражения аналитически, используем методы математической обработки статистических данных с использованием программы «Статистика».

Таблица 3.6

Энергетические показатели организма человека при ходьбе с грузом

Исходные данные		Расчетные данные	
$Q_f$ , Вт	$m_g$ , кг	$Q_M$ , Вт	$P_m$ , Вт/кг
200	10	266	6,6
200	20	331	6,6
200	30	397	6,6
300	10	399	9,8
300	20	497	9,8
300	30	596	9,8
400	10	531	19,1
400	20	663	19,1
400	30	794	19,1

В результате обработки этих данных получены аппроксимирующие уравнения для определения скорости  $V$  (м/мин) перемещения членов подразделений, снабженных основной экипировкой, включающей респиратор и необходимое оснащение – дополнительный груз 10, 20 или 40 кг при движении в разведку, на аварию или переносе пострадавшего соответственно, в зависимости от угла наклона  $\alpha$ , (...°) и высоты  $h_0$ , (м) выработки, которые имеют вид

$$\begin{cases} V_{10} = \exp(-0,00076867\alpha^2 - 0,003275\alpha - 0,843385h_0^2 + 3,458941h_0) & R=0,9622 \\ V_{20} = \exp(-0,00079448\alpha^2 - 0,003640\alpha - 0,716702h_0^2 + 3,069085h_0) & R=0,9643 \\ V_{40} = \exp(-0,00092755\alpha^2 - 0,005712\alpha - 0,538569h_0^2 + 2,505677h_0) & R=0,9596 \end{cases} \quad (3.110)$$

В уравнениях (3.110) индексы означают массу переносимого груза.

Изменение скорости перемещения членов подразделений при движении, в частности, в разведку, приведено на рис. 3.34, откуда следует, что максимальная скорость соответствует движению по горизонтальной поверхности, а при движении по наклонной поверхности (вверх или вниз) скорость экспоненциально снижается.

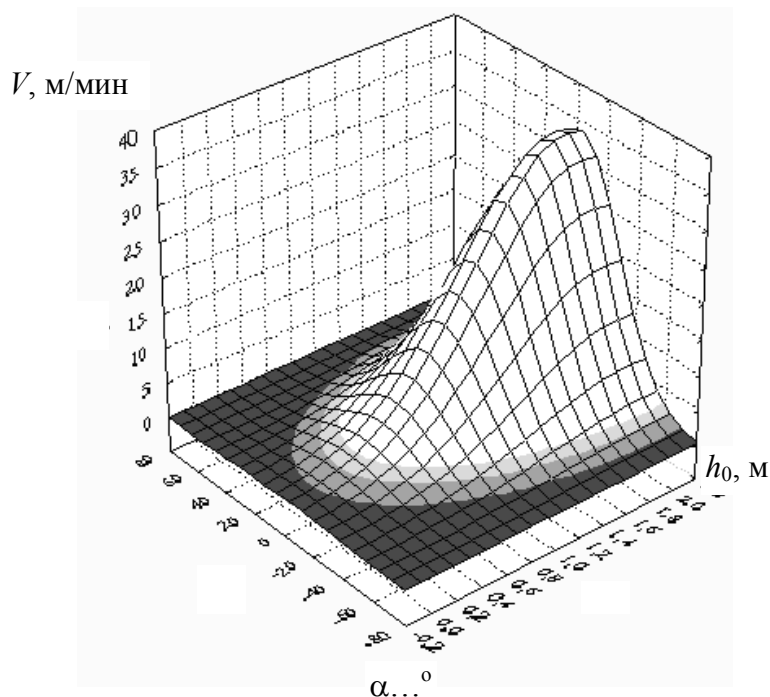


Рис. 3.34. Изменение скорости перемещения горноспасателей (членов ВГК) при движении в разведку в зависимости от высоты и угла наклона выработки

В Уставе ГВГСС приведены данные, соответствующие условиям работы в респираторе при полной видимости и температуре окружающей среды не выше  $27^{\circ}\text{C}$ . В случае, если условия отличаются, при расчете скорости движения используем поправочный коэффициент, являющийся произведением трех частных коэффициентов:  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$ . Эти же поправочные коэффициенты использовали при расчете расхода кислорода из респиратора при движении, поскольку данный параметр прямо пропорционален скорости передвижения. При необходимости, значение скорости передвижения или расхода кислорода следует умножить на коэффициент  $K$ .

Первый коэффициент, учитывающий необходимость использования респиратора при движении в непригодной для дыхания атмосфере, принимается равным единице, а при движении в пригодной для дыхания атмосфере  $K_1 = 1,2$ .

Второй коэффициент позволяет учесть уменьшение скорости движения при задымлении выработки

$$K_2 = 0,1l_0,$$

где  $l_0$  – расстояние прямой видимости при задымлении, м.

Здесь вводятся следующие ограничения: если  $l_0 \leq 2$  м, то  $K_2 = 0,2$ , а если  $l_0 \geq 10$  м, то  $K_2 = 1,0$ .

Третий коэффициент учитывает уменьшение скорости движения при повышенной температуре шахтного воздуха

$$K_3 = 1 - 0,08(t_b - 27),$$

где  $t_b$  – температура воздуха, °C.

Здесь также вводятся ограничения: если  $t_b \leq 27$  °C, то  $K_3 = 1,0$ , а если  $t_b \geq 50$  °C, то  $K_3 = 0,812$ .

В Уставе ГВГСС приведены данные о расходе кислорода на 100 м пути, а при определении энергозатрат используется значение расхода в л/мин. Эту величину рассчитывают с учетом ранее полученных данных и скорости движения респиратора  $V_a$  по зависимости

$$q_r = q_{100} \cdot V_a / 100 \quad (3.111)$$

где  $q_{100}$  – расход кислорода на 100 м пути, л.

Расход кислорода из респиратора определяется для тех же условий, что и скорость  $V$ , аппроксимируемыми уравнениями.

$$\begin{aligned} q_{r10} &= (0,000048 \alpha^2 + 0,000999 \alpha - 0,231377) h_0 + 1,998705 & R &= 0,9107 \\ q_{r20} &= (0,000051 \alpha^2 + 0,000961 \alpha - 0,223095) h_0 + 2,047465 & R &= 0,9680 \\ q_{r40} &= (0,000042 \alpha^2 + 0,000557 \alpha - 0,221836) h_0 + 2,089761 & R &= 0,9654 \end{aligned} \quad (3.112)$$

В изолирующем регенеративном респираторе с комбинированной подачей кислорода (постоянной и легочно-автоматической) часть кислорода поглощается человеком, а его излишек выходит через избыточный клапан в окружающую среду, что обеспечивает продувку дыхательной системы респиратора от заазотирования. Взаимосвязь потребления кислорода человеком и его расхода из респиратора определяется эмпирической зависимостью

$$q_p = 1,437 q_r - 1,099 \quad (3.113)$$

где  $q_p$  – потребление кислорода организмом человека, л/мин.

Энергозатраты человека характеризуют степень тяжести физической нагрузки и могут быть определены по формуле

$$Q_M = q_p K_K / 60, \quad (3.114)$$

где  $K_K$  – калорический эквивалент потребления кислорода, Дж/л.

Если значения  $q_p$  и  $K_K$  принимаются при нормальных условиях (температура 20 °C и давление 101,3 кПа), то  $K_K = 19,457 \cdot 10^3$  Дж/л. В этом случае

$$Q_M = 324,28 q_p. \quad (3.115)$$

С учетом (3.113) выражение (3.115) примет вид

$$Q_M = 324,28 (1,437 q_r - 1,099). \quad (3.116)$$

Данные, полученные на основе этих формул, обобщены в аппроксимирующих уравнениях, соответствующих условиям, принятым для уравнений (3.112)

$$\left. \begin{aligned} Q_{M10} &= (0,022\alpha^2 + 0,466\alpha - 107,819)h_0 + 574,993 & R &= 0,9107325 \\ Q_{M20} &= (0,025\alpha^2 + 0,489\alpha - 100,993)h_0 + 592,804 & R &= 0,96844742 \\ Q_{M40} &= (0,021\alpha^2 + 0,322\alpha - 104,983)h_0 + 621,509 & R &= 0,93074316 \end{aligned} \right\} \quad (3.117)$$

Изменение энергозатрат горноспасателей (членов ВГК) от массы переносимого груза и высоты выработки при движении по горизонтальной поверхности показано на рис. 3.35, где точки графика отражают ранее полученные данные и результаты экспериментов. Зависимость энергозатрат членов подразделений при перенесении груза различной массы по выработке высотой 1,7 м от угла наклона приведена на рис. 3.36. При этом принято, что отрицательные значения угла соответствуют спуску, а положительные – подъему.

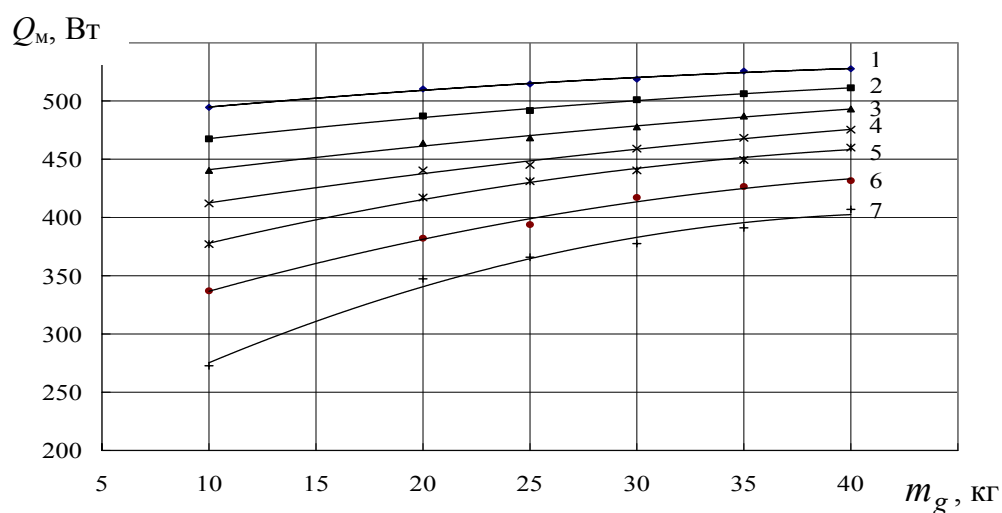


Рис. 3.35. Энергозатраты горноспасателей (членов ВГК) при движении по горизонтальной выработке в зависимости от массы переносимого груза и различной высоты прохода: 1-7 – высота выработки соответственно 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,7; 2,0 м

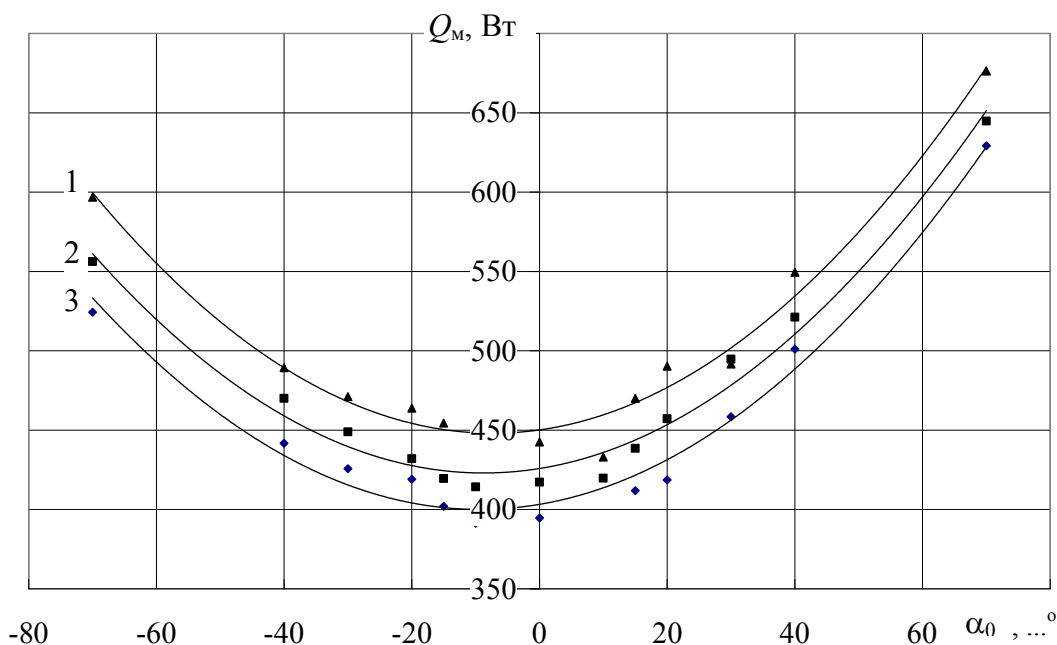


Рис. 3.36. Энергозатраты членов ВГК при переносе груза по выработкам с разными углами наклона и высотой 1,7 м: 1-3 – масса груза соответственно 40; 20; 10 кг

На основании анализа энергоемкости различных видов конкретной работы членов ВГК на месте составлена табл. 3.7. Она не охватывает все возможные виды работ, встречающиеся на практике, однако при экспресс-расчете ориентировочно позволяет учитывать тяжесть и энергоемкость работы.

Таблица 3.7

Энергоемкость основных видов работ, выполняемых на месте

Выполняемая работа	Энергозатраты, Вт
Отдых в респираторе стоя	160
Легкая работа, оказание помощи пострадавшему	240
Возведение дощатой перемычки, опалубки для гипсовой перемычки, работа отбойным молотком, домкратом	320
Возведение кирпичной перемычки, крепи, работа кайлом, лопатой, приготовление глинистого раствора	400
Возведение чураковой, шлакоблочной перемычек, приготовление цементного раствора, погрузка горной массы в вагонетку	480
Разборка завала в горной выработке	560
Быстрая разборка завала при спасении людей	640

Приведенные в данной работе математические зависимости позволяют проводить необходимые расчеты при составлении планов ликвидации аварий, прогнозировать скорость передвижения членов ВГК и горноспасателей по заданному маршруту с различными горно-геологическими условиями, время прохождения заданного маршрута, расход кислорода из респиратора и энергозатраты их организма. Это позволяет оперативно и безошибочно проводить множество расчетов по программе «Термоэрг», принимать правильное решение, что обеспечит эффективное и безопасное ведение аварийно-спасательных работ в экстремальных микроклиматических условиях шахт.



#### **4. МЕТОДЫ ПОДГОТОВКИ ГОРНОСПАСАТЕЛЕЙ К ЭРГОТЕРМИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ В ИЗОЛИРУЮЩЕМ КОСТЮМЕ**

##### **4.1. Теоретические предпосылки создания методов**

Горноспасатели по роду службы должны обладать повышенной устойчивостью к эрготермическим нагрузкам. Поэтому они периодически проходят тепловые тренировки и проверку тепловой устойчивости. Тепловые нагрузки могут создаваться двумя основными методами: при выполнении физических упражнений в тепловой камере или в изолирующем (воздухо- и паронепроницаемом) костюме. В тепловой камере проверка тепловой устойчивости и тепловые тренировки проводятся при температуре  $(40 \pm 1) ^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $(85 \pm 5) \%$ .

Тепловые камеры – это специальные изолированные помещения, оборудованные мощными электронагревателями, устройствами для увлажнения воздуха, приборами для автоматического регулирования температуры и влажности воздуха, а также эргометрическими приборами. Содержание тепловых камер и их функционирование требуют больших материальных затрат, что стимулировало поиск более простых и приемлемых в экономическом отношении методов проведения тепловых тренировок и проверки тепловой устойчивости горноспасателей.

Изолирующий костюм представляет собой комбинезон с капюшоном (рис. 4.1), который изготавливается из прорезиненной плащевой ткани и применяется в комплекте с резиновыми перчатками и резиновыми сапогами. Под комбинезон надевают хлопчатобумажное белье, хлопчатобумажную куртку и брюки, носки. На голову надевают панорамную маску с открытым дыхательным штуцером, через который осуществляется дыхание окружающим воздухом (вдох из атмосферы, выдох в атмосферу). Работа в изолирующем костюме проводится на эргометрических приборах в помещении с температурой воздуха  $18-25 ^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $40-60 \%$ . При этом за счет выделяемой человеком метаболической теплоты происходит нагревание тела человека, а тепловая нагрузка адекватна создаваемой в тепловой камере.

Проведем исследование теплового баланса горноспасателя (кандидата в горноспасатели) в системе «окружающая среда - изолирующий костюм - человек» при определении его тепловой устойчивости в изолирующем костюме. Выполняемая работа – степ-тест, т.е. подъем на ступеньку высотой 20 см и спуск с нее с частотой 20 подъемов-спусков за 1 мин.

При указанной работе горноспасателя в изолирующем костюме выделяемая им метаболическая теплота частично отводится в окружающую среду (через оболочку костюма и через органы дыхания), частично расходуется на внешнюю работу, и основная ее часть идет на нагревание самого человека.

Тепловой баланс можно выразить уравнением, включающим основные тепловые потоки, которые аналогичные (3.29, см. подраздел 3.3), Вт [6,20].

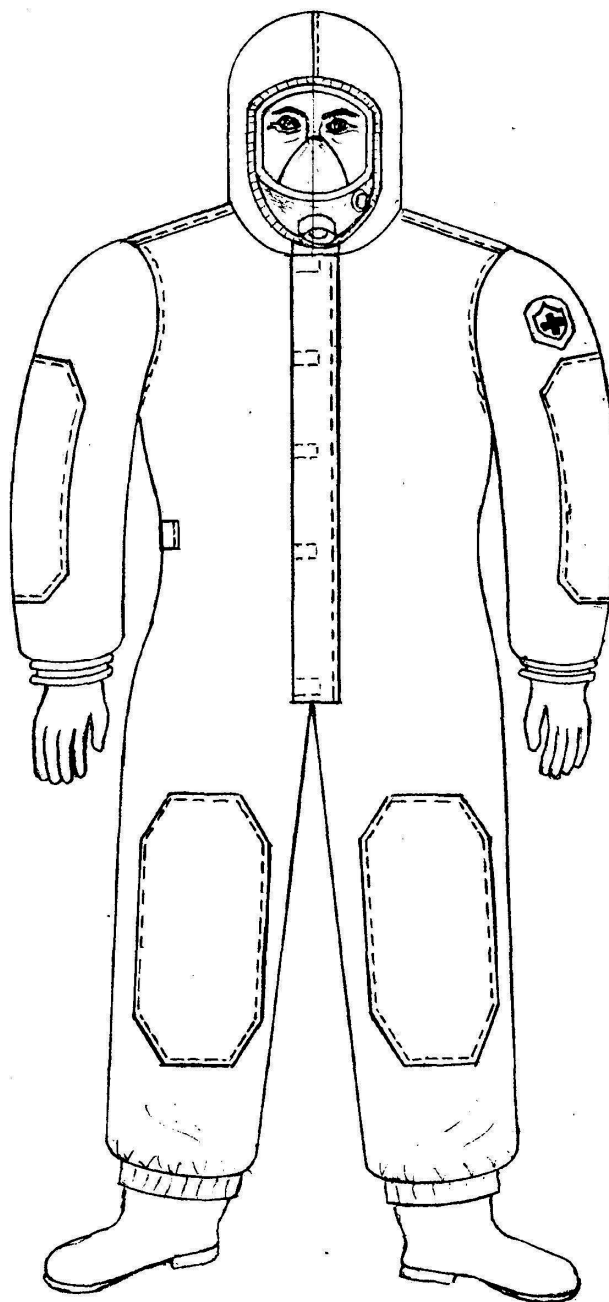


Рис. 4.1. Общий вид изолирующего  
(воздухо- и паронепроницаемого) костюма

Для определения теплопродукции организма человека необходимо рассчитать ряд промежуточных величин.

Внешняя работа,  $W_t$ , Дж, производимая человеком при поднятии на ступеньку и спуске с нее:

$$W_t = 1,33(m_t + m_g)gl_2, \quad (4.1)$$

где  $l_2$  – высота ступеньки, м.

Внешняя работа и связанные с ней далее величины рассчитаны для трех значений массы тела человека: 70; 75 и 80 кг. Остальные величины, входящие в формулу (4.1), имеют следующие значения:  $m_g = 5,0$  кг,  $g = 9,8$  м/с,  $l_2 = 0,2$  м.

Мощность  $P_t$ , Вт, развиваемая человеком при выполнении внешней работы:

$$P_t = W_t / \tau_c, \quad (4.2)$$

где  $\tau_c$  – продолжительность одного подъема на ступеньку и спуска с нее, с.

В соответствии с принятыми исходными данными  $\tau_c = 60/20 = 3$  с. Энергозатраты человека  $Q_{\text{ч}}$ , Вт, при выполнении степ-теста:

$$Q_{\text{ч}} = P_t / \mu. \quad (4.3)$$

При выполнении степ-теста принимается значение  $\mu = 0,2$ .

Используя предыдущие выражения, получаем общую формулу для определения энергозатрат человека при выполнении степ-теста:

$$Q_{\text{ч}} = 1,33(m_t + m_g)gl_2\tau_c\mu. \quad (4.4)$$

По аналогии с формулой (4.4) тепловой поток, проникающий через оболочку костюма [6]

$$Q_a = S_{\text{к}}(t_{\text{п}} - t_{\text{с}})/(1/\alpha_{\text{п}} + \delta_{\text{м}}/\lambda_{\text{м}} + 1/\alpha_{\text{н}}), \quad (4.5)$$

где  $\alpha_{\text{п}}$  – коэффициент теплоотдачи от воздуха в подкостюмном пространстве к внутренней поверхности костюма, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности костюма к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_{\text{м}}$  – толщина оболочки костюма, м;

$\lambda_{\text{м}}$  – коэффициент теплопроводности материала оболочки костюма, Вт/(м·К).

Используя данные, относящиеся к приросту ректальной температуры на 1,0 °С и принимая значения  $S_{\text{к}} = 3,5$  м<sup>2</sup>;  $t_{\text{п}} = 35,3$  °С;  $t_{\text{с}} = 22,0$  °С;  $\alpha_{\text{п}} = 4,0$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{\text{н}} = 2,0$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta_{\text{м}} = 0,26 \cdot 10^{-3}$  м;  $\lambda_{\text{м}} = 0,16$  Вт/(м·К), в результате расчета по формуле (4.6) получено значение  $Q_a = 62$  Вт. Через органы дыхания отводится тепловой поток  $Q_{\text{д}}$ , Вт:

$$Q_{\text{д}} = q_m(h_{\text{к}} - h_{\text{н}}), \quad (4.6)$$

где  $q_m$  – массовый расход воздуха, соответствующий легочной вентиляции, кг/с

$$q_m = q_v(P_c - P_k)/(R_T \cdot T_c); \quad (4.7)$$

$h_k$  – удельная энтальпия выдыхаемого воздуха, Дж/кг;

$h_n$  – удельная энтальпия вдыхаемого воздуха, Дж/кг;

$q_v$  – легочная вентиляция, м<sup>3</sup>/с;

$R_T$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$T_c$  – температура воздуха в окружающей среде, К.

Принимаем следующие значения величин:  $q_v = 0,47 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с (28 л/мин);  $P_c = 98,7 \cdot 10^3$  Па (740 мм рт.ст.); парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе при температуре 22 °С и относительной влажности 60 %,  $P_k = 1,6 \cdot 10^3$  Па;  $R_T = 0,29 \cdot 10^{-3}$  Дж/(кг·К). В результате расчета по формуле (4.7) получаем  $q_m = 0,54 \cdot 10^3$  кг/с.

Принимаем значения величин, входящих в формулу (4.6): при температуре выдыхаемого воздуха 37 °С и его относительной влажности 100 %  $h_k = 145,7 \cdot 10^3$  Дж/кг; а соответственно 22 °С и 60 %  $h_n = 47,7 \cdot 10^3$  Дж/кг. В результате расчета по формуле (4.6) получаем  $Q_d = 53$  Вт.

Теперь имеются все данные для расчета теплового баланса.

Время работы в изолирующем костюме до достижения прироста ректальной температуры тела на 1,0 °С ( $\tau_p$ , мин):

$$\tau_p = \Delta Q_1 / (Q_n \cdot 60), \quad (4.8)$$

где  $\Delta Q_1$  – накопление теплоты в организме, Вт,

$$\Delta Q_1 = C_t m_t \Delta t_t; \quad (4.9)$$

$Q_n$  – тепловой поток, нагревающий организм человека, Вт;

$\Delta t_t$  – прирост средней температуры тела, °С;

$C_t$  – теплоемкость тела человека, Дж/(кг·°С).

В формуле (4.9) принимаем массу тела человека  $m_t$  равной 70; 75 и 80 кг; прирост средней температуры тела, соответствующий приросту ректальной температуры тела на 1,0 °С,  $\Delta t_t = 1,5$  °С.

Результаты расчета по вышеприведенным формулам приведены в табл. 4.1.

Проведенные теоретические исследования показывают, что по тепловым нагрузкам на человека и по времени достижения нормированного прироста температуры тела на 1,0 °С изолирующий костюм может быть рекомендован для проведения тепловых тренировок и для определения тепловой устойчивости горноспасателей.

Таблица 4.1

Физиологические показатели человека при выполнении работы на ступеньке (степ-тест) до прироста ректальной температуры тела на 1,0 °С

Показатель	При массе тела человека, кг		
	70	75	80
Внешняя работа ( $W_t$ ), Дж	195,5	208,5	221,6
Мощность, соответствующая внешней работе, ( $P$ ), Вт	65,2	69,5	73,8
Энергозатраты человека ( $Q_o$ ), Вт	326	348	369
Теплопродукция организма человека ( $Q_{ch}$ ), Вт	260	278	295
Теплота, накопленная в организме, ( $\Delta Q_1$ ), кДж	365	391	417
Тепловой поток, нагревающий организм человека, ( $Q_n$ ), Вт	145	163	180
Время работы до достижения прироста ректальной температуры тела на 1,0 °С ( $\tau_p$ ), мин	42	40	38

#### 4.2. Определение тепловой устойчивости кандидатов в горноспасатели при профессиональном отборе, стажеров и горноспасателей после тренировок

Исследование эффективности полученных данных определения тепловой устойчивости в воздухо- и паронепроницаемом костюме (в дальнейшем - костюме) проведено на 62 кандидатах в горноспасатели, поступающих на службу в Оперативный (г. Донецк) и 3-й военизированные горноспасательные отряды.

В соответствии с «Положением о профессиональном отборе и специальных тренировках респираторщиков и командиров ГВГСС» после обследования у врачей-специалистов кандидаты в горноспасатели проходили тестирование для оценки тепловой устойчивости.

Тепловую устойчивость при профессиональном отборе определяли в специально оборудованной микроклиматической камере при температуре воздуха (40±1) °С и относительной влажности (85±5) %.

Тепловую устойчивость определяли [6] в утренние или дневные часы не ранее чем через 2 ч после приема пищи. Перед ее определением после получасового отдыха при комфортной температуре измеряли температуру тела в ректальной полости, температуру кожи на груди, лбу, тыле кисти, бедре, голени, массу тела, частоту сердечных сокращений и артериальное давление.

Войдя в камеру, обследуемый, одетый в трусы и легкую обувь, приступал к выполнению физической работы, которая заключалась в подъемах на ступеньку и спусках с нее в ритме 20 раз в минуту. Продолжительность работы определяли временем прироста температуры тела на 1,0 °С.

Во время работы визуально наблюдали за координацией движений испытуемого, цветом кожных покровов, самочувствием, теплоощущениями. Каждые 5 мин регистрировали температуру тела в ректальной полости, температуру

кожи на груди, лбу, тыле кисти, бедре, голени, частоту сердечных сокращений. После окончания работы измеряли массу тела, артериальное давление и испытуемый отдыхал в предкамере при комфортной температуре в течение (20...30) мин под контролем проводившего обследование.

Теплосодержание организма во время работы, среднюю температуру поверхности кожи  $\bar{t}_s$ , °C, среднюю температуру тела  $\bar{t}_m$ , °C, разницу между температурами тела и поверхности кожи  $\Delta t_m$ , °C, теплосодержание организма  $Q_m$ , Дж, изменение теплосодержания организма  $\Delta Q_m$ , Дж, скорость изменения теплосодержания организма  $\bar{Q}_m$ , Дж/мин, рассчитывали соответственно по формулам ГОСТ 12.4.067-79.

Данные, полученные в конце работы в микроклиматической камере, сравнивали с их начальным уровнем.

Дополнительно рассчитывали критерий теплового состояния и критерий теплового напряжения, а интегральный показатель тепловой устойчивости  $T_1$  – по формуле

$$T_1 = \tau_{oc} (100 - \Delta\Pi) / (\Pi_0 \cdot \Delta t_p), \quad (4.11)$$

где  $\tau_{oc}$  – время работы обследуемого в камере до достижения заданного прироста температуры тела в ректальной полости  $\Delta t_{п}$ , равного 1,0 °C, мин;

$\Pi_0$  и  $\Delta\Pi$  – исходный уровень и прирост частоты сердечных сокращений, мин<sup>-1</sup>.

Значение  $T_1$  равное 10 и менее, считали низким, от 10 до 15 – средним свыше 15 – высоким.

Через 2 или 3 дня после определения тепловой устойчивости в микроклиматической камере каждого из испытуемых подвергали повторному обследованию. Затем тепловую устойчивость определяли в костюме.

Проводили это для сопоставления получаемых двумя способами данных, подтверждения правомерности использования костюмов при решении вопросов экспертизы профессиональной пригодности горноспасателей.

Исследования проводили в помещении с нерегулируемой температурой воздуха (18...25) °C.

После получасового отдыха в комфортных условиях испытуемый надевал хлопчатобумажное белье, хлопчатобумажный костюм, носки, изолирующий костюм, маску и выполнял физическую работу – подъемы на ступеньку высотой 20 см и спуски с нее в ритме 20 раз в минуту.

Регистрацию физиологических показателей проводили в том объеме и последовательности, которые осуществлялись при определении тепловой устойчивости в микроклиматической камере.

Интегральный показатель при этом способе определения тепловой устойчивости  $T_2$  рассчитывали и оценивали по формуле

$$T_2 = 0,023 \tau_{oc} t_b (100 - \Delta\Pi) / (\Pi_0 \cdot \Delta t_p), \quad (4.12)$$

где  $t_{\text{в}}$  – температура воздуха в помещении, °С.

Шкала оценок уровня тепловой устойчивости была такой же, как и при определении в микроклиматической камере.

Проведена статистическая обработка полученных данных с указанием средней квадратической погрешности средних значений. Для оценки достоверности (или недостоверности) различий средних значений принята следующая норма: при  $P < 0,05$  – различие достоверно, при  $P \geq 0,05$  – различие недостоверно. Физиологические показатели и время работы в камере и в костюме до прироста температуры тела в ректальной полости на  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , влияющие на величину интегрального показателя тепловой устойчивости, приведены в табл. 4.2.

Из таблицы следует, что время работы испытуемых до прироста температуры тела в ректальной полости на  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  при определении тепловой устойчивости двумя способами отличается незначительно. В первом случае этот прирост обусловлен воздействием повышенной температуры и влажности окружающего воздуха в микроклиматической камере, во втором – накоплением метаболической теплоты в организме при затруднении его отдачи в окружающую среду в изолирующем костюме. При определении тепловой устойчивости двумя способами наблюдали одинаковый прирост частоты сердечных сокращений. Достоверных различий в интегральном показателе тепловой устойчивости не выявлено. Данные позволяют утверждать, что определение тепловой устойчивости в костюме дает результаты, приемлемые для практики профессионального отбора горноспасателей.

В целом в группе обследованных отмечен средний уровень тепловой устойчивости, а данные по времени работы до достижения прироста ректальной температуры тела на  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  практически совпадают с результатами теоретических исследований (см. табл. 4.1).

Таблица 4.2

Показатели тепловой устойчивости поступающих на службу  
в ГВГСС при определении ее двумя способами

Показатель	Способы определения	
	в микрокли- ма тической	в костюме
Исходный уровень частоты сердечных сокращений, $\text{мин}^{-1}$	$73,9 \pm 0,4$	$72,5 \pm 0,4$ $P < 0,02$
Время работы до достижения прироста температуры тела на $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , мин	$37,4 \pm 0,3$	$38,6 \pm 0,3$ $P < 0,01$
Уровень частоты сердечных сокращений к концу выполнения эрготермической нагрузки, $\text{мин}^{-1}$	$144,8 \pm 0,4$	$143,7 \pm 0,5$ $P > 0,08$
Прирост частоты сердечных сокращений, $\text{мин}^{-1}$	$70,9 \pm 0,4$	$71,2 \pm 0,4$ $P > 0,2$
Интегральный показатель тепловой устойчивости, усл. ед.	$14,8 \pm 0,2$	$15,4 \pm 0,2$ $P > 0,05$

Особенности, выявленные при анализе времени работы и частоты сердечных сокращений при определении тепловой устойчивости двумя методами, подтверждены и данными теплового состояния организма в связи с тем, что при определении тепловой устойчивости в микроклиматической камере и в костюме прирост температуры тела в ректальной полости достигал 1,0 °С, в одинаковой мере при работе повышалась средневзвешенная температура кожи, средняя температура тела, теплосодержание организма. При работе в камере и в костюме достоверных различий в данных к концу выполнения работы при определении тепловой устойчивости не выявлено.

Изменения такого же характера выявлены и при анализе значений артериального давления.

Артериальное давление определяли при помощи сфигмотонометра по методу Н.С. Короткова до начала и по окончании испытания.

Помимо значений систолического и диастолического артериального давления исследовали пульсовое и среднее динамическое давление. Пульсовое артериальное давление – разница между систолическим и диастолическим давлением. Среднее динамическое давление определялось расчетным методом по Хикему. Оно является усредненной величиной давления крови в артерии на протяжении сердечного цикла (систола и диастола). Среднее динамическое давление незначительно колеблется под влиянием внешних факторов и является достаточно надежным критерием состояния гемодинамики обследуемого.

Под влиянием работы в микроклиматической камере и в костюме систолическое артериальное давление повышалось, диастолическое – снижалось. За счет этого повышалось пульсовое давление. Среднее динамическое давление незначительно снижалось. Различия в данных выявлены при сопоставлении начального уровня и к концу работы. Это отмечено и при работе в камере и при работе в костюме. Существенных различий в данных, полученных двумя способами определения тепловой устойчивости, не выявлено.

Отклонения в показателях гемодинамики совпадали с данными определения влагопотерь, расчетов критериев теплового состояния и теплового напряжения организма.

Влагопотери при работе в микроклиматической камере и в костюме практически одинаковые. Это обусловлено равными тепловым состоянием и напряжением организма при двух способах определения тепловой устойчивости, что позволяет сделать заключение об эффективности применения костюма при экспертизе профессиональной пригодности и работоспособности кандидатов в горноспасатели. Так как у них выявлен средний уровень тепловой устойчивости при приеме на службу, необходимо ее повышение в период стажировки. В связи с этим была исследована эффективность использования костюма для повышения тепловой устойчивости во время стажировки в дыхательном аппарате.

Обследованные кандидаты в горноспасатели (62 человека) были признаны годными к работе и в соответствии с «Положением о профессиональном отборе и специальных тренировках респираторщиков и командиров ГВГСС» про-



ходили цикл тренировок в дыхательном аппарате в учебной шахте. В этот период осуществлялась тепловая адаптация стажеров.

Цель тепловой адаптации – повысить тепловую устойчивость для выполнения тяжелой физической работы в респираторе в зоне нагревающего микроклимата подземных выработках угольных шахт. Она формировалась путем прохождения одной тренировки в спецодежде и пяти тренировок в изолирующем костюме через день в период стажировки.

Первую тренировку осуществляли после выполнения комплексных задач в респираторе в выработках учебной шахты. Стажер, не выключаясь из респиратора, отдыхал в помещении с температурой воздуха (18...25)°С 10 мин, затем приступал к выполнению физической работы на вертикальном эргометре. В течение 5 мин стажер поднимал груз массой 20 кг на высоту 1,2 м и опускал его в ритме 15 мин<sup>-1</sup>. Каждый 5-минутный период работы чередовался с 5-минутным отдыхом (осуществлялись два сеанса работы и отдыха). В конце каждого периода работы и отдыха у стажера измеряли частоту сердечных сокращений. Общая продолжительность упражнения – 20 мин. Последующий 10-минутный отдых осуществлялся в респираторе. По завершении периодов отдыха до и после работы измеряли частоту сердечных сокращений и артериальное давление (систолическое и диастолическое).

Четвертую и пятую тренировки проводили, как и вторую, но время работы в костюме увеличивали до 25 мин. Три 5-минутных периода работы чередовались с двумя 5-минутными периодами отдыха. После завершения работы – отдых продолжительностью 10 мин, после чего стажер выключался из респиратора,

Шестую тренировку проводили в костюме для завершения адаптации и определения тепловой устойчивости согласно подразделу 4.2.

Данные исследования частоты сердечных сокращений до работы, в конце работы и время работы при определении тепловой устойчивости у прошедших тепловую адаптацию стажеров (62 человека) и не проходивших стажировку и адаптацию людей (60 человек).

Результаты исследований показывают, что начальный уровень частоты сердечных сокращений в обеих группах был практически одинаковый. Время работы в костюме до прироста температуры тела в ректальной полости на 1,0 °С выше у стажеров, проходивших тепловую адаптацию, у них в меньшей степени проявлялось учащение сердечных сокращений, вследствие чего интегральный показатель тепловой устойчивости был выше, чем у не проходивших тепловую адаптацию людей.

В группе стажеров, проходивших тепловую адаптацию, тепловая устойчивость повышалась. Ее уровень оценивался как высокий. В группе людей, не проходивших адаптацию, тепловая устойчивость сохранялась на среднем уровне. Это свидетельствует об эффективности использования костюма при профессиональной подготовке горноспасателей, повышении уровня тепловой устойчивости.

Данные теплового состояния организма в обеих группах обследованных, которые определяли приростом температуры тела на 1,0 °С свидетельствуют о выраженных их различиях до работы и к концу работы.

Различная подготовленность к работе, прошедших тепловую адаптацию стажеров и не проходивших ее людей, проявилась и при анализе величин артериального давления.

Прошедшие тепловую адаптацию стажеры реагировали на работу в костюме меньшим приростом систолического давления, менее выраженным снижением диастолического давления. Такие признаки характерны для более тренированных людей, хорошо переносящих физические и тепловые нагрузки.

Лучшая подготовленность прошедших тепловую адаптацию стажеров к выполнению горноспасательных работ в экстремальных условиях выявлена при анализе критерия теплового напряжения организма.

Влагопотери и тепловое состояние в обеих группах были приблизительно одинаковы. Объясняется это тем, что все обследованные работали в костюме до прироста температуры тела в ректальной полости на 1,0 °С. Но работа стажеров выполнялась большее время, с менее выраженным напряжением сердечно-сосудистой системы. Поэтому критерий теплового напряжения у них был значительно ниже по сравнению с людьми, не проходившими стажировку и тепловую адаптацию.

Более продолжительное время работы стажеров характеризовалось меньшими скоростями прироста температуры тела в ректальной полости, средне-взвешенной температуры кожи, средней температуры тела, теплонакопления, влагопотерь.

Приведенные данные свидетельствуют об эффективности проведения стажировки и тепловой адаптации в костюме, определение тепловой устойчивости в нем позволяет достоверно оценить степень повышения ее к тепловым нагрузкам после выполнения цикла тренировочных упражнений прикладного характера.

После окончания стажировки и зачисления на службу обследованные (62 человека) проходили в течение года тепловую тренировку с периодичностью один раз в месяц.

Тренировку в костюме проводили в помещении с температурой воздуха (18...25) °С в дни выполнения тренировочных упражнений в респираторе в учебной шахте, аналогично первой тренировке подраздела 4.3, но общей продолжительностью 20 мин.

По окончании тренировки горноспасатель отдыхал 10 мин, не выключаясь из респиратора, снимал костюм, в конце отдыха у него измеряли частоту сердечных сокращений и артериальное давление. В месяц, предшествующий ежегодному медицинскому переосвидетельствованию, у горноспасателей определяли тепловую устойчивость в костюме.

Параллельно были обследованы 60 человек, не проходившие в течение года тепловые тренировки и не выполнявшие работы в зоне высоких температур.

Тепловую устойчивость определяли в костюме в соответствии с подразделом 4.2 и анализировали те же физиологические показатели, которые исследовали у поступающих на службу.

Данные исследования частоты сердечных сокращений до работы, в конце работы и время работы в костюме при определении тепловой устойчивости у прошедших годичный цикл тепловой тренировки горноспасателей (62 человека) и не проходивших тепловую тренировку людей (60 человек) показывают следующее. До работы частота сердечных сокращений в обеих группах обследованных существенно не различалась. Время работы в костюме до прироста температуры тела в ректальной полости на  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  было продолжительнее в группе горноспасателей, проходивших тепловую тренировку. У них же отмечено лучшее функционирование сердечно-сосудистой системы.

К концу выполнения эрготермической нагрузки уровень частоты сердечных сокращений у горноспасателей был ниже по сравнению с людьми, не проходившими тепловую тренировку. Горноспасатели отличались высоким уровнем тепловой устойчивости, а не проходившие тренировку люди – средним. Достигнутый уровень тепловой устойчивости свидетельствует об эффективности использования костюма для тепловой тренировки горноспасателей.

Так же, как и у стажеров, проанализировано тепловое состояние обследованных. Оно характеризует процессы терморегуляции организма при приросте температуры тела в ректальной полости на  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . И в этих исследованиях, как и после стажировки, выраженные различия в данных в обеих группах наблюдались до работы и к концу ее выполнения.

В связи с тем, что прошедшие тепловую тренировку горноспасатели лучше переносили работу в костюме, у них наблюдали менее выраженное повышение систолического и пульсового артериального давления, снижение диастолического и среднединамического давления. Данные гемодинамики подтвердили лучшую тренированность и подготовленность горноспасателей к выполнению работ по сравнению с людьми, не проходившими тепловую тренировку.

Более высокий уровень подготовленности горноспасателей к выполнению аварийных работ выявлен при анализе влагопотерь, критериев теплового состояния и напряжения организма.

После тепловой тренировки работа горноспасателей сопровождалась меньшим потоотделением. Тепловое состояние в двух группах обследованных обуславливалось приростом температуры тела в ректальной полости на  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и было одинаковым. А тепловое напряжение за счет более короткого времени работы не проходивших тепловую тренировку людей оказалось у них значительно выраженнее. Эти данные свидетельствуют о лучшей переносимости горноспасателями физической работы в костюме.

За счет более длительного времени работы горноспасателей в костюме у них отмечались меньшие скорости прироста температуры тела в ректальной полости, средневзвешенной температуры кожи, средней температуры тела, теплонакопления, влагопотерь. Данные скорости изменения теплового состояния организма свидетельствуют о повышении тепловой устойчивости горноспасателей под влиянием ежемесячных тренировок в костюме. За счет рационально-

го функционирования механизмов терморегуляции под влиянием тренировок значительно повышается время работы в условиях гипертермии.

На основании полученных и приведенных выше результатов исследований на представительной группе испытуемых следует вывод о целесообразности использования костюма из воздухо- и паронепроницаемого материала в горноспасательных подразделениях для определения и повышения тепловой устойчивости поступающих на работу, стажировки и тепловой адаптации стажеров, а также тепловых тренировок горноспасателей в дыхательном аппарате.

С другой стороны, основной параметр – время работы в изолирующем костюме до достижения прироста ректальной температуры тела на  $1^{\circ}\text{C}$ , полученное при теоретических исследованиях процесса тепломассопереноса в системе «окружающая среда - изолирующий костюм - человек» (см. табл. 4.1) и испытаний тепловой устойчивости поступающих на службу в подразделения ГВГСС (см. табл. 4.2), практически совпадает. Поэтому в дальнейшем можно определять физиологические показатели при выполнении работы на ступеньке (степ-тест) по формулам, приведенным в подразделе 4.1.

#### 4.3. Компьютерная информационно-обучающая программа

Компьютерная информационно-обучающая система (ИОС) предназначена для обучения работников горноспасательной службы правилам ведения аварийно-спасательных работ в экстремальных микроклиматических условиях шахт. При этом система проводит тренировку работников по решению тактических задач и контроль усвоения полученных знаний. Конечной целью учебного процесса с использованием ИОС является усвоение обучаемым персоналом необходимого объема знаний и навыков с тем, чтобы он знал, как вести аварийно-спасательные работы в зоне с повышенной температурой (далее – ЗПТ) воздуха и использовал эти знания на практике.

Учебный материал содержит текст, иллюстрации, таблицы, графики и диаграммы, состоит из введения и семи разделов, которые делятся на подразделы по конкретным изучаемым вопросам.

В системе находятся две расчетные программы: «Глюкауф» и «Термо-эрг».

Тестирование проводится для контроля и учета усвоения учебного материала как отдельным обучаемым (при индивидуальном обучении), так и каждым обучаемым из состава учебной группы, и состоит из разделов: «Проверка знаний» и «Журнал успеваемости».

Для оценки знаний обучаемых по каждому разделу учебного материала составлены вопросы и даны ответы, один из которых правильный. При неудовлетворительной оценке знаний программа указывает по какому разделу.

После запуска системы на экране монитора появляется заставка с меню со следующими надписями: «Учебный материал», «Программы», «Тестирование», «Помощь» и «Выход». Каждая из них включает определенные функции ИОС, которые активизируются при щелчке мышью на соответствующей кнопке.

Учебный материал содержит текст, цветные и черно-белые иллюстрации, таблицы, графики и диаграммы. Он состоит из содержания, введения и шести приведенных ниже разделов.

Тема 1. Основы механизма теплообмена организма горноспасателя с нагревающей окружающей средой.

Тема 2. Определение допустимой продолжительности работы (ДПР) горноспасателя в респираторе.

Тема 3. Основные тактические приемы работы горноспасателей в ЗПТ в респираторах.

Тема 4. Средства противотепловой защиты горноспасателей.

Тема 5. Подготовка личного состава к работе в экстремальных микроклиматических условиях.

Тема 6. Оказание медицинской помощи при тепловой травме.

Каждый из разделов делится на подразделы по конкретным изучаемым вопросам, всего 28 подразделов. В начале учебного материала имеется его общее содержание с наименованиями разделов и содержание каждого раздела с наименованиями подразделов.

Информационно-обучающая система позволяет ознакомиться с двумя расчетными компьютерными программами – «Глюкауф» и «Термоэрг» и научиться работать с ними.

*Программа «Глюкауф»* в общем случае предназначена для использования в практической деятельности горноспасательной службы при планировании безопасных режимов аварийно-спасательных работ, ведущихся в ЗПТ. В составе настоящей ИОС она предназначена для обучения и тренировки личного состава выполнению на компьютере экспресс-расчета безопасных режимов оперативного задания горноспасательному подразделению, направляемому в шахту для спасения людей и ликвидации аварии. Такой расчет необходим при планировании любого оперативного задания и, особенно, сложного, содержащего много этапов и связанного с высокой тепловой и/или физической нагрузкой на горноспасателя, изменяющейся в процессе выполнения задания.

Программа базируется на положениях Устава по организации и ведению горноспасательных работ, 1997 г., требованиях и нормативах по скорости передвижения отделений горноспасателей, расходу кислорода из респираторов, допустимой продолжительности работы в зоне с повышенной температурой воздуха и других нормативных документах.

Приведена инструкция для пользователя программой «Глюкауф».

*Программа «Термоэрг»* предназначена для экспресс-расчета допустимой (ДПР) и предельной (ППР) продолжительности работы горноспасателя в ЗПТ. Она разработана в результате всестороннего анализа закономерностей процесса теплообмена организма горноспасателя с окружающей средой и подтверждена в экспериментах на людях. Для расчета используется пять факторов (исходные данные), характеризующих условия работы горноспасателя: температура воздуха, его относительная влажность и скорость движения, физическая нагрузка,

соответствующая энергозатратам горноспасателя, и тип применяемого респиратора.

При помощи программы рассчитаны все таблицы ДПР и номограмма, содержащиеся в разделе 2 ИОС. Программа «Термоэрг» вошла составной частью в программу более высокого уровня – «Глюкауф», предназначенную для компьютерного планирования безопасных режимов горноспасательных работ в ЗПТ.

После запуска программы на экране появится окно, в верхней части которого содержатся наименования четырех из пяти упомянутых выше исходных параметров и ячейки для ввода их значений. Значения температуры воздуха задаются автоматически для диапазона (25... 50) °С через каждый градус. Численные значения относительной влажности и скорости движения воздуха вводятся с клавиатуры. Программа выводит расчетные значения допустимой и предельной продолжительности работы в минутах в виде таблицы для температуры воздуха от 25 до 50 °С через каждый градус. Для просмотра всей таблицы предусмотрена полоса вертикальной прокрутки.

Тестирование проводится для контроля и учета усвоения учебного материала как отдельным обучаемым (при индивидуальном обучении), так и каждым обучаемым из состава учебной группы. Для вызова этого вида работы ИОС набрать наименование «*Тестирование*» (главное меню – заставка).

На экране появится окно «Проверка знаний и учет успеваемости» с двумя кнопками: «*Проверка знаний*» и «*Журнал успеваемости*».

В общем случае, если журнал успеваемости еще не содержит фамилий всех обучаемых и тестируемых, либо в него необходимо ввести изменения, щелкните мышью на кнопке «*Журнал успеваемости*».

При этом открывается окно «Журнал успеваемости учебной группы» с головкой таблицы «№» и «ФИО», в которую вводятся (или дополняют) с клавиатуры список учебной группы. Работу с журналом успеваемости осуществляет только преподаватель. В таблице содержатся также данные о полученных при тестировании оценках и количестве попыток ответов на контрольные вопросы по каждой теме учебного материала. Эти данные автоматически заносятся в таблицу в процессе тестирования. Окно имеет полосу горизонтальной прокрутки для просмотра данных по любому разделу материала. Для получения итоговой оценки необходимо ответить на вопросы по пяти (шести) темам, но это можно сделать в несколько приемов (например, 2 темы в первый день и 3 во второй). Количество возможных попыток прохождения теста по каждой из тем ограничивается только преподавателем. Засчитывается оценка последней попытки.

Первые пять тем и пункт «Использование расчетной программы Глюкауф» предназначены для всех обучаемых, а шестая – только для медицинских работников.

При ответе на каждый вопрос автоматически, нарастающим итогом фиксируется и выводится на экран количество вопросов, на которые даны ответы (зеленым цветом), и количество вопросов, на которые получены ошибочные

ответы (красным цветом). Все разделы учебного материала, кроме третьего, содержат по 10 вопросов, а третий – 15.

Если пользователь ответил на вопросы по всем пяти (шести) разделам, (причем учитываются и те разделы, которые не были выбраны при прохождении данного тестирования, но обучаемый отвечал на вопросы по ним ранее), то выводится диалоговое окно с общей итоговой оценкой (по всем темам) и словесным комментарием.

При этом, если обучаемый получил итоговую оценку не менее 3 баллов, ИОС автоматически позволяет доступ к следующему уровню контроля знаний и навыков обучаемого – решению им контрольной тактической задачи при помощи расчетной программы «Глюкауф».

Выполнив расчет, обучаемый проверяет правильность решения задачи с помощью кнопки *«Оценить правильность решения»*. Оценка правильности решения выполняется программой автоматически и на экран выдается об этом сообщение. Если первая часть задачи решена правильно, то можно приступить к решению ее второй части, а если неправильно, то необходимо проверить и откорректировать исходные данные и повторить решение. Правильность решения второй части задачи оценивает только преподаватель, так как существует несколько путей ее решения.

Действия преподавателя во время тестирования обучаемого. Преподаватель может сам выбирать темы, по которым будет проводиться тестирование, либо предоставить выбор обучаемому. При выборе тем преподаватель может руководствоваться оценками обучаемого по соответствующей теме и количеством попыток (сколько раз обучаемый уже отвечал на вопросы по каждой теме, причем фиксируется оценка, полученная при последней попытке).

Когда обучаемый переходит к решению тактической задачи с помощью программы «Глюкауф», преподаватель самостоятельно выбирает задачу из 10, записанных на прилагаемом к ИОС диске, и выдает ее условие обучаемому в распечатанном виде на листе формата А4. В верхней части листа указан номер задачи (от 1 до 10), и этот номер затем по запросу программы обучаемый вводит с клавиатуры для последующего автоматического контроля программой правильности решения задачи.

Правильность решения обучаемым первой части тактической задачи оценивается программой автоматически с помощью кнопки *«Оценить правильность решения»*. Оценку за решение второй части задачи выполняет преподаватель и выставляет ее в собственный журнал. Преподаватель наблюдает за процессом решения и при определении оценки руководствуется как правильностью ответа, так и скоростью решения задачи.

Приведены инструкции для пользователя и преподавателя.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ОДЕЖДЫ ГОРНОСПАСАТЕЛЕЙ

### 5.1. Методика проведения исследований

Целью проведения экспериментальных исследований является определение реальных параметров средств индивидуальной противотепловой защиты горнорабочих и членов аварийно-спасательных подразделений, использование данных для разработки математических моделей, а также подтверждение адекватности полученным результатам теоретических исследований.

Процессы тепломассопереноса в изолирующих газотеплозащитном и противотепловом костюмах, куртках, жилетах, изолирующих костюмах экстренного охлаждения пострадавших при перегревании с ОЭ-2 проводили в лабораторных и полигонных условиях НИИГД «Респиратор», газотеплозащитный костюм – в НИИТБХП и учебной шахте оперативного отряда ГВГСС, а жилет с теплоизолирующим контейнером и ОЭ-2 в реальных условиях ОП «Шахта им. Ф.Э. Дзержинского» ГП «Ровенькиантрацит».

Противогазотепловой костюм для защиты от вредных (ядовитых) веществ, проникших в горные выработки при ведении аварийно-спасательных работ, должен сохранять работоспособность и обеспечивать их защиту в газообразной среде в течение не менее 180 мин при наличии в любом сочетании в воздухе выработок таких веществ, как хлорбензол, ацетон, толуол, бензол и др. при максимальной концентрации, соответствующей их насыщенному состоянию при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ; температуре до  $40^\circ\text{C}$  и влажности окружающего воздуха до 100 % – не менее 120 мин.

В соответствии с предъявляемыми к костюму требованиями, он должен обеспечивать как противогазовую (основная функция), так и противотепловую (дополнительная функция) защиту. В его состав входят наружный изолирующий комбинезон, внутренний охлаждающий костюм, изолирующий респиратор и баллон со сжатым воздухом.

В лаборатории специальных средств индивидуальной защиты НИИТБХП проводили испытания материалов, комплектующих деталей и узлов, применяемых для изготовления газотеплозащитного костюма на химическую устойчивость и проницаемость к парам органических веществ, по гостированным методикам и «Методике определения химической устойчивости и проницаемости специальных материалов, комплектующих узлов и деталей к действию агрессивных сред» [5].

Химическую устойчивость панорамного стекла оценивали по изменению его коэффициента светопропускания в видимой части спектра.

Время обработки агрессивной средой – 180 мин, суммарная экспозиция проб равна 3600 мин.



Объектом исследований служили полиметилметакрилатное стекло (ПММА) и композиции на его основе: с двухсторонним покрытием лавсановой и триацетатной пленками.

Методика испытаний газозооштитной способности костюма подразделяется на методику исследования проницаемости материалов, из которых предполагается изготовление наружного изолирующего комбинезона, и на методику исследования проницаемости самого наружного изолирующего комбинезона.

Методика исследования проницаемости материала заключается в определении концентрации вредного вещества, проникшего через испытываемый образец материала через 180 мин (120 мин – время защитного действия костюма плюс 60 мин резерва). Исследования проводили в испытательной ячейке, имеющей верхнюю и нижнюю камеру. Между этими камерами помещали образец материала диаметром 120 мм и герметизировали его по периметру. Исследования материала проводили поочередно на проницаемость хлорбензола, ацетона, толуола, бензола и смеси этих веществ в одинаковой пропорции. В нижнюю камеру испытательной ячейки вводили 50 см<sup>3</sup> вредного вещества. Верхнюю камеру ячейки продували воздухом с объемным расходом не менее 60 л/мин. Через 180 мин продувку заканчивали и из верхней камеры отбирали пробу воздуха на анализ. Скорость протягивания анализируемого воздуха и объем поглотительного раствора определяли по результатам установочных экспериментов. Отобранную пробу воздуха анализировали на содержание в нем вредного вещества спектрофотометрическим или хроматографическим методами. Исследования проводили последовательно на трех образцах материала. Исследуемый материал считали непроницаемым по отношению к вредному веществу, если для каждого из трех образцов концентрация проникшего через материал вещества (в пересчете на площадь поверхности костюма и объем подкостюмного пространства) за 180 мин не превысит значения ПДК по ОСТ 12.17005-88. Материал также считается непроницаемым по отношению к смеси вредных веществ, если сумма отношений концентраций каждого из проникших через материал веществ к его ПДК не превышает единицы.

В соответствии с приведенной методикой для исследования были взяты три образца двухслойного материала, т.е. пакет из двух разных материалов, выбранных для предварительных испытаний. Коэффициент проницаемости двухслойного пакета из этих материалов соответствует расчетному значению (см. подраздел 3.3.1). Для внешнего слоя выбрали прорезиненный материал ПМБК-Н, а для внутреннего – ПМБК-0, а также двухслойные образцы из одного и того же материала ПМБК-ПК. Каждый из трех двухслойных образцов исследовали на проницаемость хлорбензола, ацетона, толуола, бензола и их смеси.

Методика исследования проницаемости наружного изолирующего комбинезона заключается в определении концентрации вредного вещества, проникшего внутрь комбинезона из окружающей среды через 180 мин. Исследования проводили в герметичном боксе объемом 1,1 м<sup>3</sup>. Комбинезон гермети-

зировали и помещали в бокс. На штуцер комбинезона надевали трубку и выводили ее за пределы бокса через герметизирующее уплотнение. Через эту трубку надували комбинезон воздухом до нормального расправленного состояния, в боксе испаряли 54 мл хлорбензола и с этого момента через каждые 30 мин определяли концентрацию хлорбензола в подкостюмном пространстве, отсасывая пробу воздуха через трубку. Анализ проводили спектрофотометрическим или хроматографическим методами. Комбинезон считали газонепроницаемым по отношению к хлорбензолу, если его концентрация за 180 мин не превысит значения ПДК по ГОСТ 12.17005-88.

Методика исследования противотепловой способности костюма сводится, в основном, к определению времени его защитного действия при регламентированных условиях.

Исследования проводили в тепловой камере при температуре окружающего воздуха  $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $(98 \pm 2)\%$ .

Перед исследованиями три горноспасателя (испытатели-добровольцы) проходили медицинский осмотр и получали заключение «Годен к участию в испытаниях средств индивидуальной защиты», изучали условия испытаний и обучались работе в одежде.

Предварительно определяли массу испытуемых и одежды (с количеством 27 ОЭ-2, т.е. масса 4.8 кг, согласно результатам исследований раздела 3) на медицинских весах, влияние одежды на подвижность испытуемых в нормальных микроклиматических условиях, ограничение движений при ходьбе, наклонах туловища, приседаниях, поднимании и отведении в сторону рук и ног, вращении головой и ее наклонах.

Оценку подвижности проводили по пятибалльной шкале: 5 – подвижность не ограничена; 4 – движения в полном объеме с незначительными усилиями; 3 – движения в полном объеме с умеренными усилиями; 2 – движения в ограниченном объеме с выраженными усилиями; 1 – движения в заданном объеме невозможны.

В лабораторных условиях на испытуемых крепили датчики температур в подкостюмном пространстве в области: лба, груди, предплечья, голени, стопы, ноги и кисти руки.

Измерение температуры подкостюмного пространства производили полупроводниковыми термометрами типа ТЭМП, градуированные характеристики которых отвечали требованиям ГОСТ 6651-94 и ГОСТ 8.157-75. Между кожей испытуемого и датчиком расположили прокладку из поролона толщиной  $2 \cdot 10^{-3}$  м.

Для контроля адекватности измерения температуры пододежного пространства фиксировали частоту сердечных сокращений при помощи электрокардиографа ЭК1Т-04 ТУ 64-1-3100-78, которая не должна превышать  $150 \text{ мин}^{-1}$ .

Результаты измерений фиксировали в протоколе испытаний.

Для проведения исследований и испытаний средств противогазотепловой защиты использовали измерительную технику и оборудование, перечень которых приведен в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Перечень измерительной техники и оборудования для  
экспериментальных исследований средств противогазотепловой защиты**

Наименование физической величины	Необходимая граница (диапазон измерения)	Необходимая точность (класс, погрешность)	Наименование использованного прибора (материала)	Тип прибора	Обозначение НД
1	2	3	4	5	6
Линейные размеры	(0-220) мм 0-20 м	$\pm 0,1$ мм $\pm 0,1$ мм	Штангенциркуль Рулетка	ШЦ 11	ГОСТ166-89 ГОСТ1502-95
Масса	0,1-1,0 кг (7,5-30) кг (30-150)кг	$\pm 0,001$ кг $\pm 2,5$ % $\pm 0,1$ %	Весы настольные цифровые Весы медицинские	РНЦ-10 РП-150МГ	ТУ25.06.1307-75
Время	(0-60)мин —	0,2 —	Секундомер механический Часы бытовые	СоСпр-26-2-000 Orient	ТУ25-1819.0021-90
Температура	(0-50) °С	$\pm 1$ °С	Термометр стеклянный ртутный электроконтактный	ТПК	ГОСТ 9871-75
	(0-100) °С	Кл.0,5	Потенциометр	КСП2	ДСТУ2857-94 (ГОСТ6616-94)
	от минус 50 °С до плюс 50 °С	$\pm 3$ °С	Камера климатическая	КТК-800	
	(0-200)°С	$\pm 0,5$ °С	Пирометр	НИМБУС	31557302.001.000. 000 РЭ
Температура Относительная влажность	до 50 °С до 100 %	$\pm 2$ °С $\pm 3$ %	Камера тепла и влаги	КТВ-04-155	ТУиПЯ7М 1.162.003
Скорость	(0,2-5,0) м/с	0,01	Тахометр	АСО-3	ТУ 25.07.1051.79
Давление	(0-2) МПа	$\pm 0,1$ МПа	Манометр		
Ускорение	(5-40) м/с <sup>2</sup>	от минус 10 % до плюс 25%	Стенд имитации транспортной тряски	СИТ	ТУАгМО. 005.002
Температура	(0-1000)°С	$\pm 5,0$ °С	Термопара	ТХА	Нестандартное изделие
Частота	(12-60) Гц	$\pm 0,5$ Гц	Установка вибрационная механическая	УВ-70/200	Аг М1.160. 000 ТУ

Функциональное состояние испытателя и возможность выполнения работы оценивали по следующим показателям: ограничение подвижности, частота сердечных сокращений, температура пододежного пространства, кото-

рую сопоставляли с санитарными нормами, выносливость к статистической нагрузке, время зрительно-моторной реакции, качество выполнения корректурной пробы, самооценка испытателем функционального состояния и работоспособности.

Определение работоспособности в защитной одежде проводили в соответствии с ГОСТ 12.4.061-88.

Выносливость к статистической нагрузке определяли механическим динамометром с пределом измерений  $10^3$  Н перед началом и в конце испытаний, а оценка – по продолжительности удержания испытателем усилия, соответствующего 75 % от максимального значения. Допустимым считалось снижение выносливости до 30 % фонового значения.

Время зрительно-моторной реакции определяли с помощью хронорефлексометра, оборудованного электронным хронометром типа ТХР-56. Обследуемый находился на расстоянии (0,6...0,8) м от экрана хронорефлексометра, причем палец руки находился на выключателе. Проводивший обследование подавал 100 последовательных световых сигналов с паузой между сигналами от 3 до 5 с. В момент восприятия сигнала обследуемый как можно быстрее нажимал на выключатель. При перерасчете первые пять (из 105) реакций не учитывали. Допустимым считали увеличение среднего времени реакции до 300 мс. Степень концентрации и устойчивость внимания исследовали с использованием корректурной пробы, предложенной Б. Бурдоном. Обследование проводили с помощью специальных бланков с рядами, расположенными в случайном порядке букв (таблица Анфимова) или колец с разрывами в разные стороны (таблица Ландольта). Испытуемый просматривал ряд за рядом и вычеркивал определенные, указанные в инструкции, буквы и кольца с разрывами, направленными в определенную сторону.

Качество выполнения корректурной пробы определяли по количеству букв или колец в соответствующих таблицах, которые испытатель успевал просмотреть за 5 мин, вычеркивая обусловленные буквы или кольца, а также по количеству допущенных при этом ошибок. Общее количество просмотренных знаков должно быть не менее 700, количество ошибок – не более 10.

Самооценку испытателем функционального состояния проводили по показателям психофизиологического комфорта пятибалльной шкалы: 5 – высокий уровень комфорта (самочувствие очень хорошее); 4 – самочувствие хорошее; 3 – незначительный дискомфорт; 2 – выраженный дискомфорт; 1 – резкий дискомфорт (самочувствие очень плохое). Результаты самооценки регистрировали до начала и в конце испытаний. По окончании работы испытатель давал по тем же шкалам интегральную оценку функционального состояния, а также указывал основные причины дискомфорта. Граница допустимого теплового состояния – самочувствие, оцененное в 3 бала.

Самооценку испытателем работоспособности в защитной одежде производили по пятибалльной шкале: 5 – работоспособность высокая; 4 – слегка снижена; 3 – умеренно снижена; 2 – значительно снижена; 1 – неработоспособный. Периодичность самооценки испытателем функционального состояния и работоспособности не реже одного раза в течение 10

мин оценивали по переговорному устройству. Полученные результаты по каждому показателю, характеризующему функциональное состояние испытуемого и возможность выполнения работы в защитной одежде в заданных условиях, подвергали статистической обработке по ГОСТ 8.207-76. За результат принимали среднеарифметическое с достоверной вероятностью 0,95.

После проведения указанных измерений на испытателя надевали газотеплозащитный костюм, затем он входил в тепловую камеру и последовательно выполнял работу на эргометрических приборах, виды которой, последовательность и режим приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Регламент работы испытателей в микроклиматической камере

№п/п	Вид работы	Режим работы, мин	
1	Подъем на ступеньку высотой 20 см и спуск с нее с частотой 15 мин <sup>-1</sup>	10	5
2	Работа на вертикальном эргометре, подъем и опускание груза массой 10 кг на высоту 1,2 м с частотой 20 мин <sup>-1</sup>	10	5
3	Перенос 140 шт кирпичей на расстояние 1,8 м и укладка их в штабель	10	5
4	Повторение работы: по п. 1	10	5
5	по п. 2	10	5
6	по п. 3	10	5
7	по п. 1	10	5
8	по п. 2	10	5

Этот режим работы соответствует энергозатратам от 330 до 460 Вт, то есть в среднем – тяжелой работе. С каждым испытателем проводили один опыт.

В конце каждого периода работы и отдыха у испытателя измеряли и регистрировали частоту сердечных сокращений, температуру в подкостюмном пространстве, давление кислорода в баллоне респиратора и время от начала работы.

Временем защитного действия считали время от начала работы до достижения одного из параметров допустимого теплового состояния регламентированного требованиями для тяжелой работы, т.е. допустимого значения температуры в любой точке пододежного пространства (табл. 5.3) вышеуказанной частоты сердечных сокращений.

При работе в этих условиях не допускаются жалобы на выраженное перегревание тела испытателя (верхний предел температур) или переохлаждение (нижний предел температур).

Границы допустимого и предельного микроклимата в противотепловых средствах индивидуальной защиты

Границы допустимого микроклимата					
Относительная влажность подкостюмного воздуха, %	Температура подкостюмного воздуха, °С				
	Покой	Легкая работа (I)	Работа средней тяжести		Тяжелая работа (III)
			(II а)	(II б)	
До 40	15 – 37	12 – 35	10 – 33	8 – 31	4 – 28
До 70	15 – 35	12 – 33	10 – 31	8 – 29	4 – 26
До 100	15 – 33	12 – 30	10 – 28	8 – 27	4 – 24
Границы предельного микроклимата					
Относительная влажность подкостюмного воздуха, %	Температура подкостюмного воздуха, °С				
	Покой	Легкая работа (I)	Работа средней тяжести (II а – II б)	Тяжелая работа (III)	
До 40	10 – 44	7 – 42	3 – 40	1 – 38	
До 70	10 – 42	7 – 39	3 – 38	1 – 36	
До 100	10 – 39	7 – 36	3 – 35	1 – 34	

В данной таблице не приведены верхние предельные значения температур для категории «очень тяжелая», к которой, нередко относятся энергозатраты членов ВГК шахты (см. подраздел 3.3.8). В связи с этим, в пододежном пространстве изолирующей одежды с водолеяной системой охлаждения относительная влажность достигает до 100 %. Интерполируя и экстраполируя верхние значения температур  $t_{\Pi}$ , °С, третьей строки табл. 5.2 получили выражение для ее определения в зависимости от энергозатрат  $Q_M$ , Вт:

$$t_{\Pi} = -0,0367Q_M + 36,94 \quad (R^2 = 0,9864). \quad (5.1)$$

Полученные значения температур в пододежном пространстве сравнивали с температурами, полученными из выражения (5.1), и при их равенстве определяли допустимую продолжительность работы.

После проведения исследований в тепловой камере испытатели проводили испытания костюмов в полном снаряжении в учебной шахте ГВГСС с целью выполнения аварийно-спасательных работ в реальных условиях шахт. При этом выполняли следующие виды работ: спуск по уклону и движение по выработкам, прокладка линии связи и проверка ее работы, измерение темпе-

ратуры, влажности, скорости движения воздуха и содержания концентрации СО в нем, установку парусной перемычки, кладку бетонитовой перемычки, прокладку пожарного рукава и работу со стволом, перенос огнетушителей и работу с ними, вынос пострадавшего из шахты на поверхность.

Медицинские работники ГВГСС определяли частоту сердечных сокращений испытуемых, оценивали удобство костюма в эксплуатации и его работоспособность по вышеприведенным баллам.

Для определения эффективности защиты противотеплового костюма членов ВГК шахты и горноспасателей от теплового лучистого потока при тушении пожара в начальной стадии развития испытания проводили в опытно-экспериментальной штольне полигона НИИГД «Респиратор», площадь поперечного сечения которой равна  $4 \text{ м}^2$ , а длина  $100 \text{ м}$ .

На расстоянии  $30 \text{ м}$  от устья штольни на металлических подставках располагали  $30 \text{ м}$  резиновой конвейерной ленты типа РТЛО шириной  $1,2 \text{ м}$ , в конце которой находилась деревянная крепь на расстоянии  $1 \text{ м}$  из расчета их горения в течение не менее  $60 \text{ мин}$ .

Предварительно определили расстояние от испытуемого до очага пожара, при котором интенсивность  $q$  падающего лучистого потока на единицу площади поверхности костюма, была равна  $5 \text{ кВт/м}^2$  (см. подраздел 3.1)

$$q = k_0 E, \quad E = \varepsilon \sigma T_G^4, \quad (5.2)$$

где  $k_0$  – коэффициент облучения костюма, зависящий от относительного расстояния  $\bar{x} = x / \sqrt{S_1}$ ;

$E$  – излучаемая мощность очага пожара,  $\text{кВт/м}^2$ ;

$S_1$  – площадь передней части наружной оболочки костюма, воспринимающая тепловое излучение,  $\text{м}^2$ .

При исходных данных:  $q = 5,0 \text{ кВт/м}^2$ ,  $\varepsilon = 0,7$ ,  $S_1 = 1 \text{ м}^2$ ,  $k_0 = 0,06$ ,  $T_G = 1200 \text{ К}$ , излучаемая мощность очага пожара  $E = 83 \text{ кВт/м}^2$ , а расстояние, на котором должен находиться испытуемый от очага пожара,  $x = 2,0 \text{ м}$ .

Для моделирования процесса горения конвейерной ленты определяли скорость воздушного потока, необходимого для создания вентилятором в штольне при равенстве его расхода в реальной выработке, по зависимости

$$V_{\text{ш}} = \frac{S_{\text{в}} V_{\text{в}}}{S_{\text{ш}}}, \quad (5.3)$$

где  $S_{\text{в}}, V_{\text{в}}$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$  и скорость движения воздуха в выработке,  $\text{м/с}$ ;

$S_{\text{ш}}$  – площадь поперечного сечения штольни,  $\text{м}^2$ .

Для конвейерной выработки при исходных данных  $S_B = 9 \text{ м}^2$ ,  $V_B = 1,0 \text{ м/с}$  и площади поперечного сечения штольни  $S_{\text{шт}} = 4 \text{ м}^2$  скорость воздуха в штольне  $V_{\text{шт}}$  должна равняться  $2,5 \text{ м/с}$ .

После розжига конвейерной ленты испытателя снаряжали в противотепловой костюм, при горении ленты на расстоянии  $1 \text{ м}$  он подходил к очагу пожара на расстояние примерно  $2 \text{ м}$  и имитировал его тушение с помощью порошкового огнетушителя ОПШ-10. По мере выгорания ленты испытатель перемещался в сторону очага пожара, выдерживая это расстояние. При этом регистрировали температуру пододежного пространства и частоту сердечных сокращений, а функциональное состояние испытателя и возможность выполнения работы в теплозащитном костюме оценивали по показателям, аналогично, как и при исследованиях газотеплозащитного костюма в тепловой камере.

Всего проведено три опыта с участием горноспасателей (испытателей-добровольцев), имеющих опыт по тушению пожаров.

Исследования теплозащитной способности куртки (см. рис.) и жилета (см. рис. 2.3 и 2.5 подраздела 2.3) проводили в тепловой камере при температурах  $(33 \pm 1)$ ,  $(35 \pm 1)$ ,  $(37 \pm 1)$ ,  $(39 \pm 1) ^\circ\text{C}$ , влажности  $(98 \pm 2) \%$  и скорости движения воздуха  $1,0 \text{ м/с}$  с участием пяти испытателей в возрасте от 25 до 40 лет.

Испытаниям подвергали по три опытных образца курток и жилетов трех размеров.

Испытатели заходили в тепловую камеру, открывали контейнер с замороженными ОЭ-2, снаряжали ими куртку или жилет, закрывали контейнер, одевали одежду и приступали к выполнению физической работы, регламент которой приведен в табл. 5.1. Перед началом, при выполнении и после окончания работы, выходе из камеры у испытателей измеряли температуру тела в ректальной полости, кожные температуры с помощью тех же датчиков и мест расположения, используемых при исследованиях теплозащитной способности противогазотеплового костюма, и частоту сердечных сокращений. При достижении допустимых значений одного из показателей (температуры тела  $38 ^\circ\text{C}$  и частоты сердечных сокращений  $150 \text{ мин}^{-1}$ ) поступала команда по переговорному устройству о переоснащении одежды. Испытатель снимал их, освобождал от использованных ОЭ-2, вынимал следующую партию из контейнера, снаряжал ими одежду, одевал и снова приступал к выполнению аналогичной работы. Для жилета этот процесс длился в течение шести часов (рабочая смена горнорабочих).

Все остальные исследования испытателей в куртке и жилете проводили аналогично исследованиям с газотеплозащитным костюмом. Всего проведено пять испытаний.

Теплосодержание организма во время работы, среднюю температуру поверхности кожи, среднюю температуру тела, разницу между температурами тела и кожи, теплосодержание организма, ее изменение и скорость рассчитывали по формулам ГОСТ 12.4.067-79.



При статистической обработке данных исследований определяли среднеквадратичную погрешность средних значений. Для оценки достоверности (или недостоверности) различий средних значений принята следующая норма: при  $P < 0,05$  – различие достоверно, при  $P \geq 0,05$  – недостоверно.

И, наконец, испытания охлаждающего жилета с теплоизолирующим контейнером проводили в условиях ОП «Шахта им. Ф.Э. Дзержинского» ГП «Ровенькиантрацит», суть которых заключалась в следующем. Два горнорабочих, один из которых использовал охлаждающий жилет с теплоизолирующим контейнером, в котором находились 60 ОЭ-2, второй – спецодежду, выполняли выемку ниш вручную под комбайн в выработке лавы с температурой воздуха 32 °С, скоростью движения 1,2 м/с и влажностью 98 %. Цель испытаний – определение эффективности применения охлаждающего жилета, времени переснаряжения ОЭ-2 в течение смены и повышения производительности работы горнорабочего, снаряженного в охлаждающий жилет по сравнению с горнорабочим, одетого в спецодежду. При этом измерялась ЧСС, а работоспособность горнорабочих определялась по субъективному фактору. Эти данные сравнивались с данными экспериментальных исследований испытателей в тепловой камере и результатами теоретических исследований.

Для участия в испытаниях костюма (см. рис. 3.13 подраздела 3.2) экстренного охлаждения были отобраны пять испытателей-добровольцев из состава респираторщиков горноспасательного отряда и членов ВГК шахты, имеющих опыт работы в кислородных изолирующих респираторах в условиях нагревающего микроклимата и прошли предварительное медицинское освидетельствование, включающее замер аксиллярной температуры, артериального давления, ЧСС, регистрацию мышечной силы и выносливости к статическому усилию. Определение силы проводили путем максимального сжатия ручек динамометра, выносливости – измерение времени сжатия ручек динамометра с силой, равной трем четвертым показанного максимального усилия, удерживаемого возможно длительное время. Окончанием измерения времени, характеризующего выносливость мышц, считали снижение удерживаемого уровня более, чем на 40 Н.

После этого испытатель раздевался до плавок, его взвешивали на медицинских весах, на него накладывали электроды для регистрации электрокардиограммы, которую производили с помощью электрокардиографа, регистрацию динамики кожных температур – термодатчиков, расположенных на лбу, предплечье, груди, спине, бедре, голени и стопы.

Температуру ядра тела регистрировали ректально на глубине около 0,12 м с абсолютной погрешностью 0,1 °С на электронном цифровом медицинском термометре, а кожные температуры – 12-ти канальной электронной термостанции с такой же погрешностью.

У испытателя регистрировали исходный уровень ректальной и кожных температур, а с помощью системы преобразования электрокардиосигналов в звуковые подсчитывали ЧСС. Кроме того, производили опрос о субъективной

оценке теплоощущений по 21-бальной системе, результаты которой фиксировали в специальных бланках.

Затем испыталитель заходил в теплую камеру с предварительно установившейся температурой  $40^{\circ}\text{C}$ , относительной влажностью воздуха  $(96 \pm 2)\%$  и начинал выполнять степ-тест, поднимаясь на ступеньку высотой 0,2 м с частотой 15 циклов в минуту. На второй минуте регистрировали ЧСС и ректальную температуру ( $t_p$ ), а на пятой и десятой минутах – дополнительно температуру кожи ( $t_k$ ) в семи вышеуказанных частях тела. После десяти минут работы испыталитель в течение пяти минут отдыхал в тепловой камере, лежа на кушетке, причем на второй и пятой минутах производили регистрацию ЧСС. Параллельно проводили опрос о самочувствии и субъективной оценке теплоощущений.

Виды и регламент работ аналогичен табл. 5.2.

Процесс работы и отдыха продолжали до тех пор, пока у испыталителя  $t_p$  принимала предельное значение  $38,6^{\circ}\text{C}$  или ЧСС  $170 \text{ мин}^{-1}$ . После этого его укладывали в костюм экстренного охлаждения, в котором в положении лежа он отдыхал на кушетке в тепловой камере с прежними микроклиматическими условиями. При этом через каждые 5 минут восстановительного периода регистрировали  $t_p$  и ЧСС, а через 10 минут – только  $t_p$ , производили опрос о самочувствии и теплоощущениях. Восстановительный период продолжался до достижения  $t_p$ , равной  $38,0^{\circ}\text{C}$  или ЧСС –  $150 \text{ мин}^{-1}$ , после чего испыталитель выходил из тепловой камеры, у него измеряли артериальное давление, силу кисти и выносливость к статическому усилию, а после снятия комплекта его взвешивали на весах, производили опрос о самочувствии и оценке эффективности использования комплекта охлаждения.

Все регистрируемые показатели протоколировали, рассчитывали средневзвешенную температуру кожи, среднюю температуру тела, теплосодержание организма и значения изменения показателей. Полученные результаты подвергали статистическому и корреляционно-регрессионному анализу с помощью программы «Статистика»..

## 5.2 Результаты исследований

В результате исследований каждого из трех двухслойных образцов на проницаемость хлорбензола, ацетона, толуола, бензола и их смеси установлено, что все три образца соответствуют требованиям по газопроницаемости, так как в течение 180 мин концентрация проникшего через двухслойный пакет вредного вещества не превысила ПДК (для смеси не превысила нормированной единицы). На основании результатов исследований выбрали изготавливать наружный изолирующий комбинезон двухслойным: наружный слой – из прорезиненной ткани ПМБК-ПК, внутренний ПМБК-О.

В соответствии с вышеприведенной методикой исследовали наружный изолирующий комбинезон газотеплозащитного костюма. Через 30 мин после

начала испытания концентрация хлорбензола в боксе равнялась  $44 \cdot 10^3$  мг/м<sup>3</sup>, то есть в 2,6 раза выше концентрации, зафиксированной в выработке шахты «Александр-Запад», что является резервом по безопасности членов ВГК (горноспасателей).

Динамика концентраций газообразного хлорбензола на внутренней поверхности третьего слоя оболочки комбинезона представлена на рис 5.1, где сплошными линиями обозначены результаты теоретических исследований (1, 2) соответственно при концентрации хлорбензола в боксе НИИТБХП  $44$  г/м<sup>3</sup> во время испытаний комбинезона и  $17$  г/м<sup>3</sup>, обнаруженной в горных выработках шахты «Александр-Запад», точками – данные испытаний опытного образца.

Отсюда следует, что при увеличении концентрации хлорбензола во внешней среде в 2, 6 раза, его значение в ПП ( $15$  мг/м<sup>3</sup>) в течение 180 мин не превышает допустимое, максимальная погрешность результатов теории и данных экспериментов равна около 14 %, причем данные испытаний ниже результатов теории.

Предварительный анализ данных по изменению температуры в пододежном пространстве газотеплозащитного костюма при испытании в тепловой камере с температурой воздуха  $(40 \pm 1)$  °С и влажностью  $(98 \pm 2)$  % показал, что она в области основной части тела, головы, стоп ног и кистей рук испытуемых незначительно отличается друг от друга. Поэтому, на рис. 5.2 приведены данные средних значений этой температуры (1), для ЧСС – максимальные их значения при выполнении упражнений без учета отдыха (3) и результаты теоретических исследований (2) динамики температуры в ПП. На основании результатов, приведенных на рис. 5.1 и 5.2, следует, что требования к газотеплозащитному костюму выполнены, так как при заданном времени его использования температура в ПП и ЧСС испытуемых не превышает допустимых значений.

Из рис. 5.2 следует, что при работе испытуемых в газотеплозащитном костюме в течение 120 мин ЧСС и температура в ПП не достигают своих допустимых значений, полученная в результате теоретических исследований она, начиная с 60-й мин выше, чем данные эксперимента, максимальная погрешность которой не превышает 16 %.

Испытуемые при исследованиях в тепловой камере и в учебной шахте ГВГСС (рис.5.3) оценили подвижность в костюме по трехбалльной шкале – движение в полном объеме с умеренными усилиями, их выносливость оказалась как допустимая, так как ее снижение не превысило 27 % фонового значения, время зрительно-моторной реакции и качество выполнения корректурной пробы – допустимые, самооценка испытуемых работоспособности в газотеплозащитном костюме – умеренно снижена (3 балла), функционального состояния – 3 балла (незначительный дискомфорт).

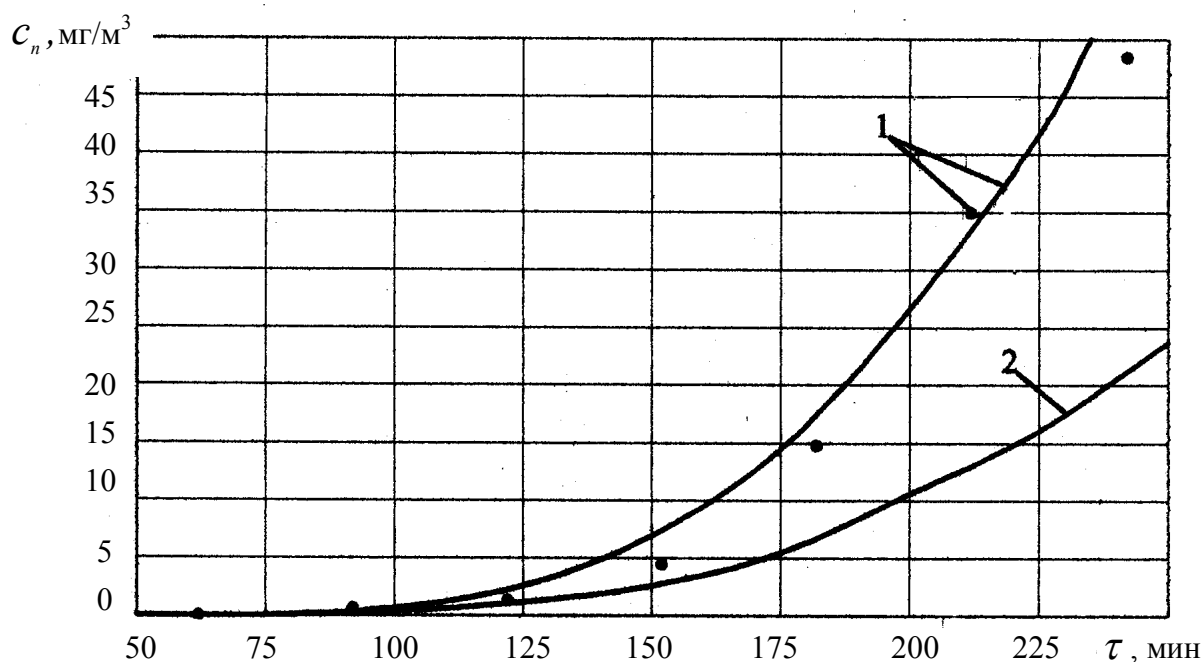


Рис. 5.1. Данные экспериментальных (•) и результаты теоретических (1,2) исследований динамики концентрации хлорбензола в поддежном пространстве комбинезона газотеплозащитного костюма при его концентрации в окружающей среде  $44 \text{ г/м}^3$  (1) и  $17 \text{ г/м}^3$  (2)

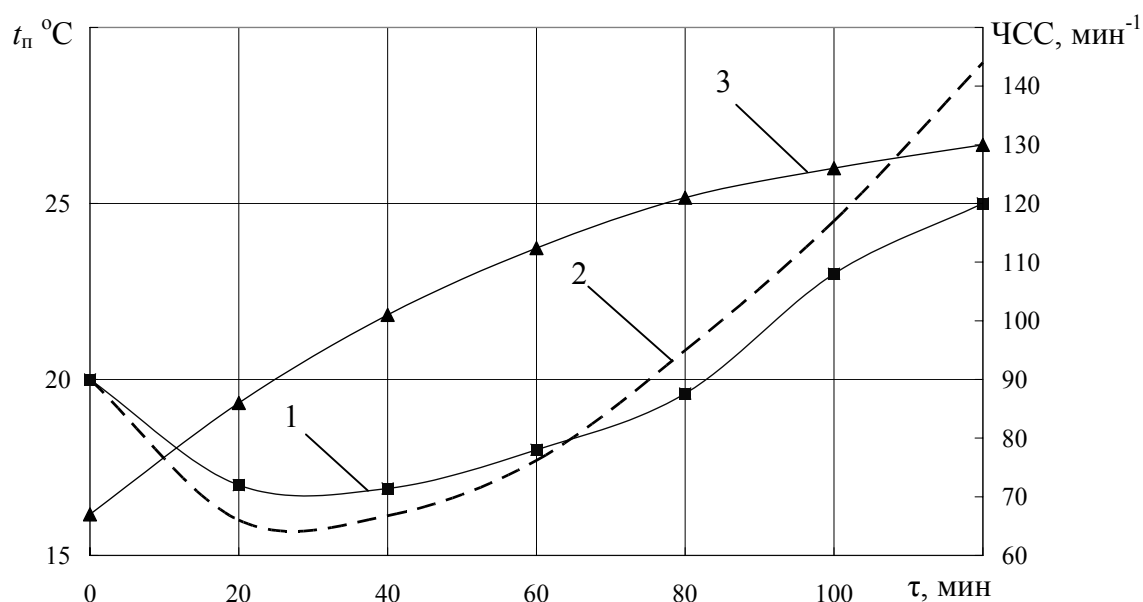


Рис. 5.2 Результаты экспериментальных (1), теоретических (2) исследований динамики температуры в поддежном пространстве газотеплозащитного костюма и ЧСС (3) испытателей при температуре воздуха в тепловой камере  $(40 \pm 1) ^{\circ}\text{C}$  и влажности  $(98 \pm 2) \%$



Рис. 5.3. Испытатели в газотеплозащитных костюмах после выполнения работ в учебной шахте ГВГСС

На основании результатов теоретических исследований и испытаний разработанного газотеплозащитного костюма определили технические и эксплуатационные его параметры, обеспечивающие эффективное и безопасное ведение аварийно-спасательных работ членами ВГК в условиях химического и повышенного температурного воздействия.

В результате проведенных исследований в опытно-экспериментальной штольне при воздействии теплового лучистого потока от пожара около  $5 \text{ кВт/м}^2$  защитной одежды члена ВГК, состоящей из термостойкого, теплоотражательно-го наружного комбинезона и внутреннего костюма с водолеяной системой охлаждения получены зависимости изменения во времени температуры наружной поверхности (1) подкостюмного пространства в области основной части тела (4) стоп ног (2), кистей рук (3) и частоты сердечных сокращений (6), приведенные на рис. 5.4.

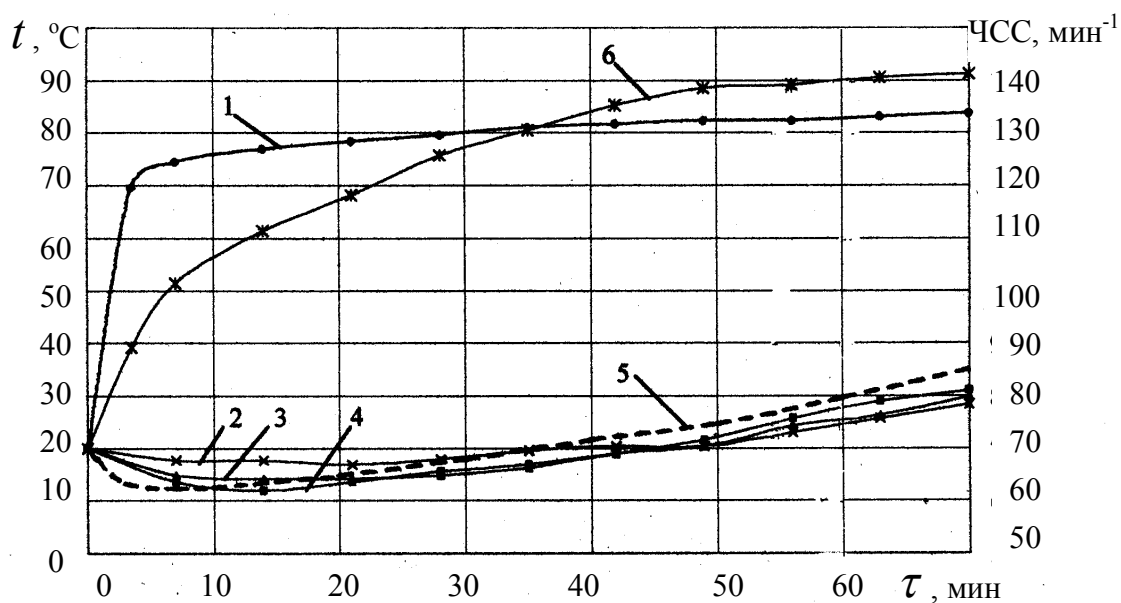


Рис. 5.4. Результаты экспериментальных (1 – 4; 6) и теоретических (5) исследований динамики температуры на наружной поверхности (1), в подкостюмном пространстве в области стоп ног (2), кистей рук (3), основной части тела (4) и ЧСС (6) испытуемых при воздействии теплового лучистого потока  $5 \text{ кВт/м}^2$

Результаты теоретических исследований температуры тела испытуемых в области основной части тела (4) стоп ног (2), кистей рук (3) и подкостюмного пространства в этих местах практически равны, поэтому приведены результаты в виде одной кривой. Полученные результаты показывают, что температуры в различных участках тела испытуемых незначительно отличаются друг от друга, с учетом санитарной нормы по температуре подкостюмного пространства около  $30^{\circ}\text{C}$ , допустимая продолжительность работы испытуемых равна 70 мин, а по результатам теоретических исследований (кривая 6) – 60 мин, то есть погрешность не превышает 17 %.

Сравнительные результаты расчетов времени защитного действия одежды, как основного ее параметра, полученные по разработанным методам (штриховая и штрихпунктирная линии), а также при испытаниях в микроклиматической камере (сплошная линия, для куртки ТК-50 (обозначение 1), костюмов ТК-60М (2), ПТК-80 (3) и ПТК-300(4) приведены на рис 5.5. Отсюда следует, что относительная погрешность в результатах по существующему методу, который не учитывает тепловыделение респиратора и теплообмен за счет испарения пота горноспасателя, и эксперименту составляет от 20 до 40 %.

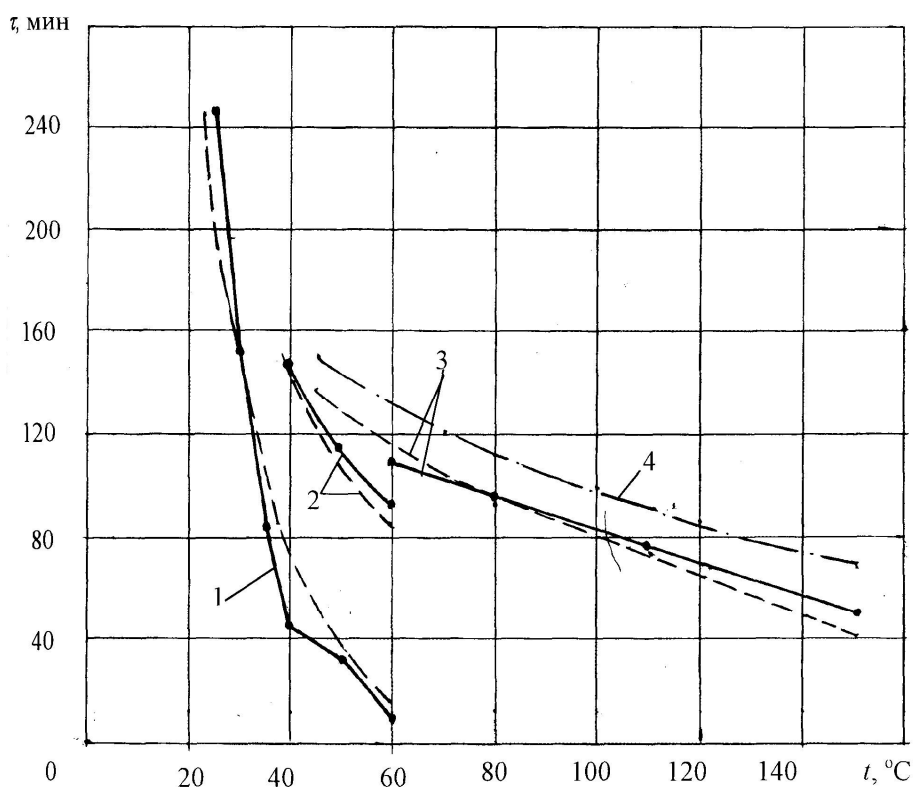


Рис. 5.5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований зависимости времени защитного действия противотепловой одежды от температуры окружающей среды: — — — — — по разработанному методу; • — — — — — по эксперименту; 1 – куртка ТК-50; 2 – костюм ТК-60М; 3 – костюм ПТК-80; 4 – костюм ПТК-300

Результаты теоретических и данных исследований показывают, что по разработанным методам максимальная погрешность равна около 20 %, за исключением результатов для куртки ТК-50 (около 50 %) только при температуре воздуха окружающей среды 40 °С. Это можно объяснить тем, что при этой температуре резко повышается ректальная температура за счет нагревания неохлажденных частей тела испытуемых, которая не учтена при теоретических исследованиях.

Как отмечено в подразделе 3.2 для защиты горноспасателей при тушении пожаров, а также ведения работ в условиях высоких температур (до 300 °С) и теплового излучения разработан и испытан противотепловой костюм ПТК-300 в опытно-экспериментальной штольне НИИГД по указанной методике. Испытания проведены при температурах от 45 до 150 °С воздушной среды, а также 300 °С и теплового излучения пожара 13 кВт/м. В последнем случае получено, что срок его защитного действия при этих параметрах равен 20 мин.

С учетом степени черноты 0,1 для наружной поверхности оболочки костюма ПТК-300, который оснащен системой охлаждения, аналогичной костюму ПТК-80, относительная погрешность времени защитного действия, полученная в результате расчета и опыта при фиксированных температуре 300 °С и лучистому тепловому потоку  $Q = 13 \text{ кВт/м}^2$  равно 25 %.

Тепловое состояние испытуемых в охлаждающем жилете при исследованиях в тепловой камере с температурой воздуха от 33 до 39 °С приведено в табл. 5.4, а сравнительные результаты расчета допустимой продолжительности их работы с данными экспериментов представлены на рис. 5.6.

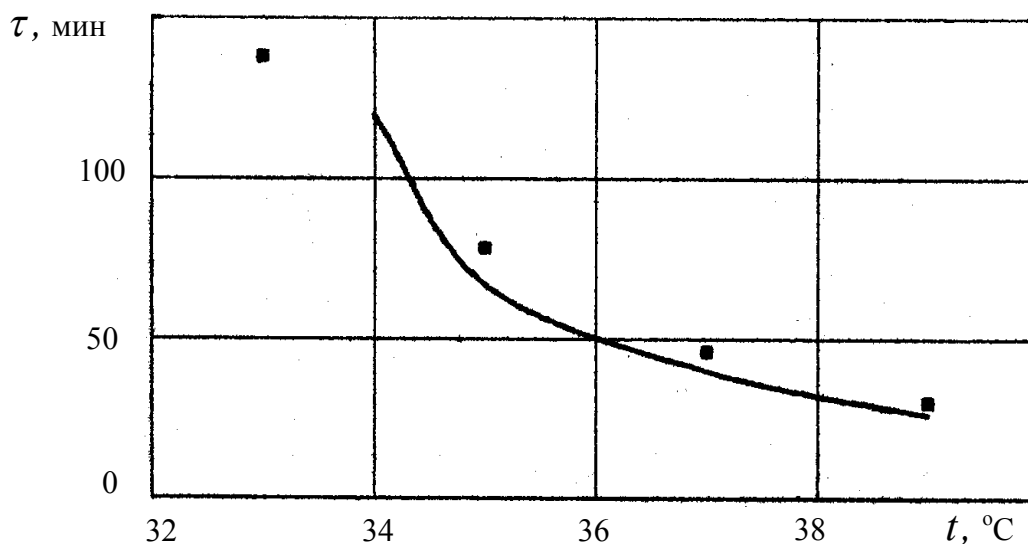


Рис. 5.6. Сравнительные результаты расчета (кривая) допустимой продолжительности работы испытуемых в охлаждаемом жилете с данными экспериментальных исследований (•)

Тепловое состояние испытуемых в охлаждающем жилете при исследованиях в тепловой камере (влажность  $(98 \pm 2) \%$ , скорость воздуха 1 м/с)

Показатели	До работы	После работы при температуре, °С			
		33±1	35±1	37±1	39±1
1. Время работы, мин		138	78	46	30
2. Частота сердечных сокращений, мин <sup>-1</sup>	72,3 ±0,82	121,2 ±1,02	127,4 ±1,14	129,7 ±1,42	134,5 ±1,37
3. Артериальное давление систолическое, мм. рт. ст.	116,8 ±1,08	134,6 ±0,93	139,3 ±0,96	138,9 ±0,86	140,1 ±0,89
4. Артериальное давление диастолическое, мм. рт. ст.	75,4 ±0,88	64,3 ±0,73	64,7 ±0,72	65,4 ±0,76	65,8 ±0,80
5. Температура тела в ректальной полости, °С	37,2 ±0,06	37,9 ±0,06	38,0 ±0,08	38,0 ±0,07	38,0 ±0,08
6. Средняя температура поверхности кожи, °С	33,0 ±0,08	35,4 ±0,07	35,6 ±0,08	35,8 ±0,07	35,8 ±0,08
7. Средняя температура тела, °С	35,9 ±0,08	37,2 ±0,06	37,4 ±0,07	37,5 ±0,07	37,5 ±0,08
8. Теплосодержание организма, кДж/кг	125,4 ±0,13	129,1 ±0,12	129,3 ±0,15	129,4 ±0,14	129,7 ±0,12

Анализ приведенных результатов показывает, что основные параметры испытуемых: ЧСС и температура тела испытуемых не превышают допустимых значений (см. табл. 5.3), а максимальная погрешность допустимой продолжительности их работы, полученная в результате теоретических исследований (120 мин) по сравнению с данными экспериментов (138 мин) при температуре воздуха  $(33 \pm 1) ^\circ\text{C}$  равна 15 % (см. рис. 5.6).

Испытуемые при исследованиях оценили подвижность в жилете по пятибалльной шкале – работоспособность высокая, их выносливость допустимая (снижение не превысило 20 % фонового значения), время зрительно-моторной реакции и качество выполнения корректурной пробы – допустимые (количество ошибок от 4 до 6), самооценка испытуемых работоспособности в жилете – высокая (5 баллов), функционального состояния – самочувствие хорошее (4 балла).

И, наконец, эффективность применения охлаждающего жилета по сравнению со спецодеждой горнорабочих определяли при их одинаковой работе



по выемке ниши в лаве ОП «Шахты им. Ф.Э Дзержинского» ГП «Ровеньки-антрацит» вручную.

Основные данные горнорабочих: время работы и ЧСС в горной выработке с температурой 32 °С, влажностью 97 % и скоростью движения воздуха 1,4 м/с приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Основные данные горнорабочих  
при работе в охлаждающем жилете и спецодежде

Снаряжение горнорабочих	Время выполнения задания, мин	ЧСС в конце работы, мин <sup>-1</sup>
Охлаждающий жилет	150	133
Спецодежда	222	168

Отсюда следует, что горнорабочий в охлаждающем жилете выполнил задание за 150 мин, причем оснащал жилет ОЭ-2 дважды, горнорабочий в спецодежде – за 222 мин, то есть производительность горнорабочего в первом случае примерно в 1,5 раза выше, чем во втором, ЧСС первого в конце работы не достигает допустимого значения, второго – находится около предельного значения (170 мин<sup>-1</sup>), что привело к ухудшению его здоровья: головокружение, слабость, повышенное употребление жидкости.

Самооценка работоспособности и самочувствие горнорабочего в жилете – хорошее (4 балла), а горнорабочего в спецодежде – 2 балла (значительно снижена и выраженный дискомфорт).

ОЭ-2 в теплоизолирующем контейнере находились в замороженном виде в течение рабочей смены.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований определили техническую характеристику охлаждающего жилета горнорабочих.

При испытании костюма экстренного охлаждения пострадавших при перегревании перед работой в тепловой камере все испытуемые ощущали тепловой комфорт, так как тепловое состояние их оценивалось как оптимальное: среднее значение теплосодержания организма  $Q_T$  равнялось (124,48±0,42) кДж·кг<sup>-1</sup>, средневзвешенной температуры кожи  $t_K = (33,2±0,20)$  °С, ректальной температуры  $t_P = (36,9±0,07)$  °С, ЧСС = (60±0,6) мин<sup>-1</sup>.

В процессе испытаний проводили контроль состояния испытуемых по двум основным показателям: ЧСС и ректальной температуры, динамика которых приведена на рис. 5.7.

Отсюда следует, что ЧСС – очень динамичный физиологический показатель, значение которого в период работы резко возрастало и превышало у некоторых испытуемых в конце работы по переносу кирпичей 160 мин<sup>-1</sup>, однако, в среднем ее значение равнялось (129±5.6) мин<sup>-1</sup>, при отдыхе отмечали незначи-

тельное ее восстановление или постепенное увеличение в отдельные периоды отдыха.

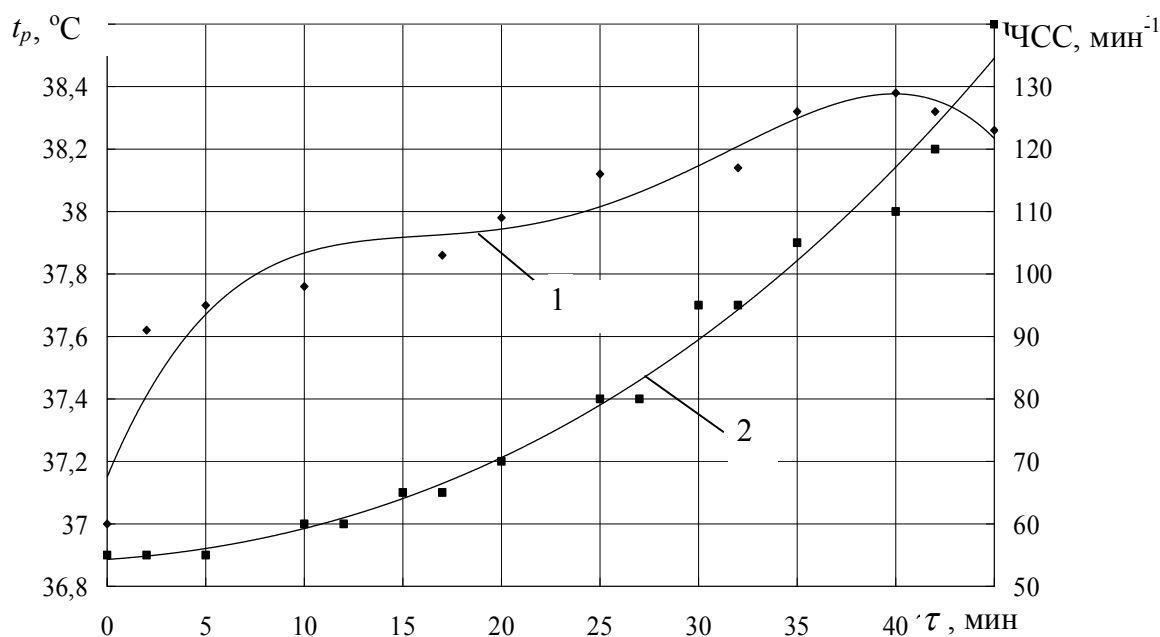


Рис. 5.7. Динамика изменения ЧСС (1) и  $t_p$  (2) испытуемого в процессе эрготермической нагрузки:

♦, ■ — данные эксперимента

Предельного значения  $t_p$  достигает на 50 мин. Перед началом охлаждения теплоощущение испытуемые оценивали «очень тепло», а двое из них отмечали «очень жарко». Наиболее выражено ощущались перегревания головы, лица, груди и стоп ног. У испытуемых отмечали увеличение сердцебиения, слабость, головокружение, рассеянность, беспокойство, тяжесть в ногах.

Дальнейшее пребывание в тепловой камере без охлаждения в течение более 45 мин считалось невыносимым.

Динамика ректальной температуры и ЧСС испытуемых в процессе охлаждения непосредственно в тепловой камере с помощью костюма (рис. 5.8) показывают, что в начале восстановительного периода  $t_p$  повышается, а затем снижается и на 30-й минуте она в основном принимает допустимое значение (38 °C). В первые минуты охлаждения испытуемые отмечали чувство приятной легкой прохлады по всему телу, исчезали головокружение, слабость, существенно улучшалось самочувствие, нормализовался ритм работы сердца и к 20-й минуте они все по субъективному мнению готовы были выполнять физическую работу, охлаждение организма нормализовалось до допустимого и отмечалось как комфортное.

Максимальный градиент температур между охлаждаемыми и неохлаждаемыми участками тела равен не более 6,7 °C. Согласно ранее проведенным исследованиям даже разница температур 10 °C при локальном охлаждении не вызывает дискомфорта у человека на фоне общей гипотермии, что свиде-

тельствует о «запасе комфортности» разработанного костюма экстренного охлаждения, а максимальное снижение выносливости не превышает 12 %.

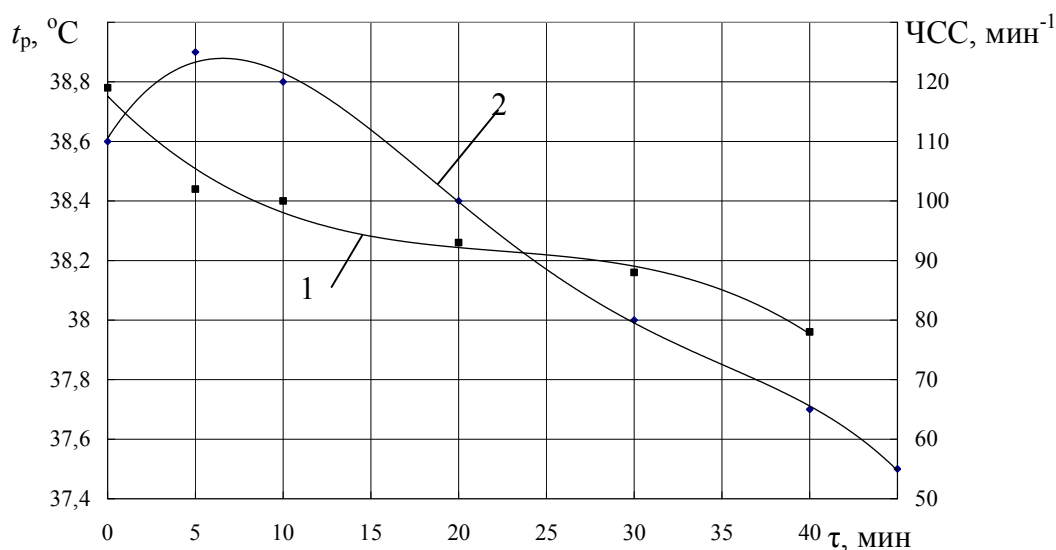


Рис. 5.8. Динамика изменения ЧСС (1) и  $t_p$  (2) испытуемых в процессе экстренного охлаждения в костюме: ◆, ■ — данные эксперимента

Динамика ректальной температуры и ЧСС в процессе эрготермической нагрузки испытуемых описывается аппроксимирующими уравнениями

$$t_p^H = -2 \cdot 10^{-5} \tau^3 + 0,17 \cdot 10^{-2} \tau^2 - 0,119 \cdot 10^{-1} \tau + 36,915 \quad (R = 0,9970);$$

$$ЧСС^H = -1,22 \cdot \tau^4 + 0,199 \cdot 10^{-1} \tau^3 - 0,6131 \tau^2 + 8,0075 \tau + 67,047 \quad (R = 0,9657),$$

а в процессе экстренного охлаждения

$$t_p^O = -2,4 \cdot 10^{-6} \tau^4 + 0,3257 \cdot 10^{-3} \tau^3 - 0,928 \cdot 10^{-2} \tau^2 + 0,9146 \cdot 10^{-1} \tau + 36,611 \quad (R = 0,9993);$$

$$ЧСС^O = -0,18 \cdot 10^{-2} \tau^3 + 0,1233 \tau^2 - 3,0073 \tau + 117,61 \tau \quad (R = 0,9900).$$

Для сравнения эффективности охлаждения с помощью костюма по изложенной выше методике провели серию исследований с участием тех же испытуемых, но с охлаждением в термонеutralном микроклимате (ТНМ) помещения предкамеры. После достижения предельного теплового состояния испытуемых вывели из тепловой камеры, где они сидя отдыхали при температуре 25 °C, относительной влажности воздуха 70 %, что характерно для горных выработок со свежей струей. При этом установлено, что скорость снижения ректальной температуры при охлаждении в 1,7 раза выше, чем при отдыхе обнаженных испытуемых в ТНМ.

Следовательно, есть все основания предполагать, что в шахте, в случае непредвиденных обстоятельств, горнорабочий (член ВГК) после перегрева, охлажденный с применением костюма экстренного охлаждения, сможет самостоятельно покинуть зону повышенных температур и подняться на поверхность.

На основании результатов исследований получили техническую характеристику костюма для оказания доврачебной помощи пострадавшим при перегревании, который также может быть применен для снижения болевого синдрома при механических травмах.

Следует отметить, что при испытаниях одежды ни один из параметров: частота сердечных сокращений и температура тела в ректальной полости не превысил своего допустимого значения на всем диапазоне изменения температур воздуха окружающей среды, за исключением второго параметра для куртки при температуре 40 °С. При этом подвижность, работоспособность, показатели психологического комфорта оценены испытуемыми как удовлетворительные, а срок защитного действия (время работы до достижения допустимых вышеуказанных параметров) соответствует нормативно-технической документации.

Таким образом, полученные результаты теоретических и данные экспериментальных исследований по определению параметров противогазотепловой одежды для горноспасателей, членов ВГК шахты и горнорабочих позволили обосновать их конструктивное исполнение и техническую характеристику.

## **6. ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ЧЛЕНОВ ПОЖАРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ**

### **6.1. Эрготермические нагрузки пожарных при ведении аварийно-спасательных работ**

Боевой устав пожарной охраны регламентирует, что основными задачами газодымозащитников является спасение людей, проведения разведки и гашения пожара в помещениях с непригодной для дыхания средой, а также создание нормальных условий для подразделений, которые осуществляют гашение пожара, путем выпуска дыма, изменения направления газовых потоков, удаления веществ и сосудов, перекрытия аппаратов и трубопроводов, из которых при горении выделяются отравленные газы или пары горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, которые могут создать взрывоопасную концентрацию в зоне действия пожарных.

Специфической особенностью деятельности газодымозащитников является то, что производимые работы, связанные с опасностью травмирования и риском для жизни через возможные взрывы и обвалы, ограниченной видимости или полным ее отсутствием, высокой температурой, чаще всего высокой влажностью воздуха. При работе в защитных дыхательных аппаратах, теплоотражающих и особенно теплозащитных костюмах, они испытывают большую физическую нагрузку, значительное напряжение всех функциональных систем организма, в том числе терморегуляции, нагрузки на психонервную систему.

Физические нагрузки при тушении пожаров и ликвидации аварий в целом можно отнести к категории тяжелого физического труда. В настоящее время тушение пожаров в большинстве случаев проводится вручную (прокладка рукавных линий, работа со стволами и пеногенераторами, раскрытие конструкций, спасение людей, эвакуация имущества и так далее), а объем так называемой малой механизации (бетоноломы, ножницы для резания арматуры, пневматические перфораторы, электродолбежники, механические пилки и так далее) при ряду работ не большой. До этого стоит прибавить, что ношение противогаза и работа в нем увеличивает затрату энергии человека приблизительно на 25-27 % в сравнении с обычными условиями. Характеристика некоторых разных работ газодымозащитников по степени веса в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88 приведена в табл. 6.1[12].

Работа в кислородных изолирующих противогазах (КИП), которыми в основном оснащены пожарные части, занимает особенное место в труде пожарных-газодымозащитников, потому что она создает на пожарах специфические условия дыхания и влияет на физиологические функции организма человека, благодаря вдыханию газовых смесей с высоким содержанием кислорода и водяного пар, иногда с повышенным содержанием двуокиси углерода и высокой температурой вдыхаемого воздуха. Кроме того, дыхательная система КИП создает повышенное сопротивление дыханию человека, а также

увеличивает вредное пространство, которое утрудняет дыхание и влияет на его характер.

Таблица 6.1

Характеристика разных работ газодымозащитников  
на пожаре по степени тяжести

Вид работы	Степень тяжести
1. Спасение людей (вынос потерпевших)	тяжелая
2. Разведка	средняя
3. Эвакуация имущества (материалов, сосудов)	тяжелая
4. Перемещение с рукавной линией под напором воды	тяжелая
5. Работа со стволом	средняя
6. Работа с пеногенератором	тяжелая
7. Раскрытие конструкций (вручную и механическим инструментом)	тяжелая
8. Перекрытие вентилей аппаратов и трубопроводов	средняя
9. Перекрытие технологических задвижек при работе в теплозащитном костюме	тяжелая

При работе в дыхательных аппаратах со сжатым воздухом на организм пожарного действуют меньше неблагоприятных факторов, это – дополнительное сопротивление дыханию, вредное пространство маски и масса аппарата.

При ведении работ из гашения пожаров в разных погодных условиях организм пожарных может поддаваться влиянию резких и многократных перепадов внешней температуры. Вблизи очага пожара на пожарного действует значительное тепловое излучение, которое вызывает необходимость применения средств индивидуальной защиты – теплоизолирующих и теплозащитных костюмов. Их приложение вместе с дыхательным аппаратом повышает еще в большей степени, чем работа в защитной одежде, физическая нагрузка за счет массы костюмов. Кроме того, значительно повышается психоэмоциональное напряжение пожарного, потому что при работе в защитных костюмах резко снижается обзор окружающего пространства, отсутствующий контроль за работой дыхательного аппарата, ограничивается свобода движений.

В зависимости от условий возникновения и развития пожаров, их характера и особенностей объекта, работа звеньев пожарных может проводиться как в обычной атмосфере, так и в сильно задымленной непригодной для дыхания среде. В последнем случае ее выполнения без применения дыхательных аппаратов невозможно. Удельный вес работ в противогазах за последние десять лет сложил 40,6 %, при этом 90,8 % выполнялось в кислородных изолирующих противогазах и 9,2 % – в дыхательных аппаратах со сжатым воздухом.

Характер производимых работ и их удельный вес в общем объеме работ представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Длительность и число производимых работ  
при гашении пожаров в аппаратах защиты дыхания

Виды работ	Процент от общего количества работ, %		Средняя длительность работы, мин
	по частоте	по длительности	
1. Разведка	32,3	17,5	9,1
2. Спасание людей	4,8	2,7	9,5
3. Работа с водяными стволами	31,7	46,6	24,8
4. Работа с пенными стволами	3,3	5,1	26,0
5. Раскрытие и разборка конструкций	15,3	16,0	17,6
6. Разборка завалов	5,0	4,9	16,0
7. Эвакуация материальных ценностей	7,6	7,2	16,0

Из представленных данных видно, что разведка пожара и работы по тушению пожаров составляют приблизительно 67 % случаев и занимают по длительности около 70 %. Значительно меньший удельный вес приходится на работы из раскрытия конструкций и разборки завалов – около 20 %, эвакуация материальных ценностей 7,6 % и, наконец, последнее место занимает спасение людей – 4,8 %.

Средние величины, которые характеризуют количество работ, выполняемых звеньями пожарных в аппаратах защиты дыхания (АЗД) в процентах к общему числу работ на пожарах в зависимости от их длительности, а также распределение работы звеньев в зависимости от их длительности при однократном включении в АЗД представлены в табл. 6.3.

Как свидетельствуют приведенные в табл. 1.3 данные, наибольшая доля работ в противогазах (56,7 %) и при одноразовом включении в противогаз (41,2 %) выполнялась при длительности работ до 30 мин.

Рассмотрим процессы теплообмена организма пожарного с окружающей средой.

В организме человека постоянно происходит образование теплоты в результате окислительных процессов при расщеплении еды и за счет его мышечной деятельности. Теплотворность в организме играет значительную роль. При интенсивности обмена веществ в состоянии спокойствия, равной 87 Вт, в пожарного при выполнении физической работы в теплозащитном

костюме она может вырасти до 700-800 Вт, при этом приблизительно 80-85 % ее превращается в теплоту.

Таблица 6.3

Относительное количество работ у АЗД (1) и случаев однократного включения в АЗД (2) в зависимости от длительности работы

1	Длительность работы, мин	до 30	свыше 30 до 60	свыше 60 до 90	сверх 90 до 120	свыше 120 до 180	свыше 180	—
	Количество работ в АЗД, %	56,7	30,8	5,3	3,7	0,9	2,6	—
2	Длительность работы, мин	до 15	свыше 15 до 30	свыше 30 до 45	свыше 45 до 60	свыше 60 до 90	сверх 90 до 120	свыше 120
	Количество случаев работы при однократном включении в АЗД, %	35,2	41,2	15,6	6,0	1,3	0,4	0,3

При нормальных и низких температурах окружающей среды, пока температура кожи выше температуры воздуха, теплоотдача происходит путем конвекции, теплопроводности и радиации. Высокая температура окружающей среды вызывает нагревание кожных покровов и, если температура кожи ниже температуры воздуха, то теплоотдача этими путями прекращается и происходит только путем испарения пота. При испарении каждого грамма воды из поверхности кожи организм отдает 2,43 кДж. Однако интенсивность испарения пота зависит от разницы парциальных давлений водяного пара над поверхностью кожи и в окружающем воздухе. При относительной влажности 100 % испарение, как правило, прекращается.

При высокой температуре окружающей среды и тяжелой физической нагрузке увеличения скорости движения воздуха не предпринимает охлаждающего действия, а наоборот, увеличивает эффект, который нагревает.

Влияние теплового излучения на организм имеет ряд особенностей, в сравнении с эффектом высокой температуры воздуха, который нагревает. В первую очередь, это более глубокое прогревание, которое приводит к повышению температуры кожи, тканей и внутренних органов. К важнейшим последствиям теплового излучения стоит отнести возникновение ожогов. При использовании боевой одежды значительная часть теплового излучения задерживается им и не достигает кожи в течение некоторое время. Однако отсутствие специальной поверхности, которая отбивает, приводит к быстрому нагреванию одежды, которая способствует накоплению теплоты в орга-



низме. В теплоотражающих и теплозащитных костюмах, которые имеют металлизированное покрытие, которое отбивает лучезарную теплоту, организм пожарного некоторое время не перегревается при высшей радиации. Поэтому, если плотность теплового потока в зоне работы не превышает  $4,2 \text{ кВт/м}^2$ , пожарные могут работать в боевой одежде и касках с защитными щитками. При более интенсивном тепловом лучезарном потоке работа должна проводиться в ТЗК под прикрытием водяных распыленных струй, которые препятствуют прохождению лучезарной теплоты.

Условия среды на пожарах по степени опасности для пожарного можно условно подразделить на три зоны.

Первая зона – условия, которые создают на достаточном отдалении от фронта пламени, температура не превышает  $(60...70) ^\circ\text{C}$ , тепловая радиация  $(1,2...4,1) \text{ кВт/м}^2$ .

Вторая зона – опасные условия, которые создают внутри пылающего помещения или вблизи фронта пламени, верхняя граница температуры этой зоны около  $300 ^\circ\text{C}$ , тепловой радиации  $(4,2...14,0) \text{ кВт/м}^2$ .

Третья зона – чрезвычайно опасные условия, которые создаются, например, при общем вспыхе в помещении или при взрыве. При этих условиях температура достигает  $1000 ^\circ\text{C}$  и более, а радиация  $(100...200) \text{ кВт/м}^2$ .

При работе пожарных в 2-й и 3-й зонах без дыхательных аппаратов и теплозащитной одежды могут вызывать поражение легких и опеки тела, а также поверхностные повреждения одежды. Во всех трех зонах может наступить тепловое поражение пожарных при достижении ректальной температуры тела  $38,6 ^\circ\text{C}$  и частоты сердечных сокращений –  $170 \text{ мин}^{-1}$ .

При температуре сухого воздуха  $150 ^\circ\text{C}$  дыхание становится очень затруднительным, температура  $16 ^\circ\text{C}$  вызывает ожог сухой кожи через 30 с, а  $180 ^\circ\text{C}$  вообще нестерпимая. При радиации  $2 \text{ кВт/м}^2$  ожоги кожи второй степени наступает через 100 с, а при  $10 \text{ кВт/м}^2$  – через 10 с.

Температура воздуха измеряется сухим и влажным термометром или психрометром, тепловая радиация - актинометром.

Из вышеизложенного vyplывает, что пожарные, в основном, производят работы, которые относятся к категории «тяжелой», в условиях высоких температур (до  $1000 ^\circ\text{C}$  и более) и тепловой радиации (до  $200 \text{ кВт/м}^2$ ) с длительностью при разведке и тушении пожара около 35 мин. При этом не приводятся данные об энергозатратах при выполнении разных видов работ.

Рассмотрим эффективность защиты пожарных существующими термостойкими протигазотепловыми средствами, которые находятся на их оснащении, с учетом приведенных экстремальных микроклиматических условий, которые влияют на них, и тяжести производимых работ, а также аварийно-спасательных подразделений других отраслей промышленности Украины, за рубежом и регламентацией их работы.

## 6.2. Существующие способы и средства индивидуальной противогазо-тепловой защиты пожарных

Безопасность деятельности пожарных в условиях высоких температур достигается комплексом нормативно-профилактических мероприятий, направленных на регламентацию длительности и тяжести труда: параметров микроклимата, повышения физической и психологической подготовленности и тепловой стойкости, применения средств индивидуальной противотепловой защиты. В аварийной обстановке нормализация микроклимата на месте ведения аварийно-спасательных работ, как правило, невозможная, и на первый план выступают мероприятия относительно использования средств индивидуальной противотепловой защиты и нормированию труда.

В настоящее время как средства индивидуальной защиты органов дыхания пожарных применяются два типа изолирующих дыхательных аппаратов: со сжатым воздухом (ДАСП) без регенерации дыхательной смеси (открытый цикл) и с сжатым газообразным кислородом (КИП) с регенерацией дыхательной смеси (закрытый цикл).

В пожарной охране используются ДАСП следующих типов: АСВ-2, ВЛАДА, «Украина», ЛАНА и др., а также КИП: КИП-8, Р-30, Луганск-2 и др.

Для создания безопасных условий работы на пожаре применяется боевая одежда из винилискожи (трудно воспламеняющаяся), а для защиты пожарных от тепла – два вида костюмов: теплоотражающий (ТВК) и теплозащитный (ТЗК), разработанные сотрудниками бывшего ВНИИПО МВД СССР.

ТВК предназначен для защиты пожарной вот теплового излучения до  $14 \text{ кВт/м}^2$  при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ. Он не является средством защиты от непосредственного влияния пылящих газов, пламени и может использоваться для работы в непосредственной близости от поверхности пламени, раскаленных конструкций домов, сооружений и материалов в течение 2-3 мин. В комплект костюма входят куртка, штаны с бахилами и капюшон с пелериной. При работе во вредной для органов дыхания атмосфере применяется противогаз или аппарат со сжатым воздухом, который надевается поверх куртки под капюшон, выполненный заодно с пелериной.

Теплозащитный костюм предназначен для защиты пожарных от высокой температуры и пламени при тушении пожаров. Он может быть использован для работы на границе пламени. ТЗК состоит из комбинезона с отсеком дыхательного аппарата, капюшона, однопалых рукавиц и сапог. Противотепловая защита осуществляется за счет использования многослойного пакета тканей и утеплителя. Внешний слой изготовлен из металлизированной ткани. Костюм используется в комплекте из КИП или ДАСП.

Для тушения пожаров в зоне тепловой радиации ( $4,2 \dots 14,0$ )  $\text{кВт/м}^2$  пожарными используется ТВК, а свыше  $14 \text{ кВт/м}^2$  – ТЗК.

Допустимая длительность работы средней тяжести (разведка пожара, работа со стволом и т.д.) в ТВК при тепловых потоках 10,5, 7,0 и  $4,2 \text{ кВт/м}^2$

должна равняться соответственно не более 10, 15 и 20 мин, а при тяжелой работе (передвижение со стволом, перенесение груза, разборки конструкций и т.д.) при этих же условиях не более 8, 12 и 16 мин.

Допустимая длительность работы средней тяжести в ТЗК (ТК-800) в зоне с температурой среды до  $(450...650) ^\circ\text{C}$  и тепловым потоком  $(5...59) \text{ кВт/м}^2$  должна составлять не более 13 мин, а длительность тяжелой работы в этих условиях - не более 9 мин. При этом пожарный должен ежеминутно изменять свою ориентацию относительно фронта пламени в пределах  $180^\circ$ .

Допускается кратковременный контакт с пламенем при температуре  $800 ^\circ\text{C}$  и выше, тепловом потоке  $(85...90) \text{ кВт/м}^2$ . Разрешается заход в пламя на время не более 15 с, общее время мероприятия должно быть не более 1 мин, причем это время должно входить в общую длительность работы в ТЗК.

При менее жестких тепловых условиях в зоне работы, т.е.  $(14...35) \text{ кВт/м}^2$ , время работы пожарного в ТЗК не должен превышать 20 мин.

При необходимости применения ТЗК при высокой температуре не в зоне влияния тепловой радиации, допустимое время работы ограничивается: при температуре  $(200...230) ^\circ\text{C}$ , длительность работы не должна превышать 15 мин, при  $(100...120) ^\circ\text{C}$  – не более 20 мин.

Пользуясь таблицами о данных, которые характеризуют плотность теплового потока в зависимости от площади горения нефтепродуктов и расстояния от фронта пламени, а также аналогичными данными при горении сжиженного газа, и, зная тяжесть производимой работы, руководитель тушения пожаров может ориентировочно рассчитать допустимое время работы в ТВК и ТЗК для конкретных условий и определить количество необходимого резерва звеньев пожарных для успешного тушения пожаров.

Длительность непрерывной работы пожарных в противогазах и спецодежде, которая допускается при отсутствии тепловой радиации, зависит от температуры окружающей среды, относительной влажности и скорости движения воздуха. Без учета последнего фактора допустимое время работы пожарных для наиболее типичных условий, которые создаются на пожарах в помещениях, по трем диапазонам относительной влажности воздуха приведено в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Допустимое время непрерывной работы пожарных в спецодежде  
КИП и ДАСП в зависимости от температуры и влажности воздуха

Температура воздух, $^\circ\text{C}$	Допустимое время, мин при относительной влажности воздуха, %		
	15-49	50-84	85-100
31	90	90	90
35	90	70	50

40	60	50	25
45	50	40	20
50	45	35	15
55	40	30	10
60	35	20	5
65	30	20	-
70	25	15	-

Первый диапазон низкой влажности (15...49) % встречается при проведении разведки в условиях высокой температуры, второй – повышенной влажности (50...84) % наблюдается при тушении пожара водой и пеной в жилищных и производственных помещениях с высокой температурой, третий - высокой влажности (85...100) %, которая возникает при проведении разведки и работе с водяными и пенными стволами в ограниченном пространстве, например, в тоннелях, подземных галереях, каналах кабельных коммуникаций, очень больших подвалах и потому подобных местах.

Длительность работы пожарных при тушении пожаров и ликвидации аварий в непригодной для дыхания среде в условиях высокой температуры и тепловой радиации должна ограничиваться, но не указано, к каким значениям, при этом не учитывается скорость движения воздуха и энергозатраты пожарных.

С целью безопасного проведения разведки в условиях высоких температур и предотвращения перегревания организма пожарного необходимо делать расчет допустимого времени на движение звена пожарных вперед и назад. При прохождении звена вперед по горизонтальному пути или подъеме по лестнице или трапам половина общего допустимого времени выделяется на передвижение вперед и половина на движение назад. При спуске звена вниз по лестнице или трапам на передвижение вперед выделяется одна треть времени, а на подъем назад – две трети. После окончания расчетного времени на движение вперед звено пожарных должно немедленно возвращаться.

В последние годы на оснащение подразделений пожарной охраны поступает следующая основная боевая одежда, разработанная и изготовлена предприятием «Индекс».

Комплект одежды пожарной «МЕЧТА» предназначен для личного состава пожарной охраны и защищает от высоких температур, тепловых лучевых потоков, возможных выбросов пламени при работе в экстремальных ситуациях, которые возникают при гашении пожаров, проведении разведки и спасения людей, а также от неблагоприятных климатических влияний (ветра, осадков). В конструкции применены современные материалы с полимерным покрытием, повышенной прочности и эффективным водозащитным барьером.

В комплект «МЕЧТА» входят куртка с отложным воротником, штаны на бретельках, краги. Отличительной чертой комплекта «МЕЧТА-1» является наличие в нем утеплителя.

Теплоотражающий костюм «Индекс-1» предназначен для защиты пожарных от теплового излучения высокой интенсивности, позволяет длительное время находиться в непосредственной близости от очага, с высокой степенью мобильности и эффективности производить необходимые работы по ликвидации аварийных ситуаций. Он состоит из куртки, штанов, рукавиц и жилета с капюшоном. Дыхательный аппарат находится внешне.

Термозащитный костюм «Индекс-1200» предназначен для использования при тушении пожаров большой интенсивности (на нефтехранилищах, нефтяных и газовых фонтанах), включая прямой контакт и запад в открытое пламя. В этом костюме пожарный может находиться в эпицентре огня, как утверждают авторы разработки, в течение как минимум 5 минут. Материалы и конструкция, что используются при изготовлении костюма, обеспечивают его многократное использование при непосредственном контакте с открытым огнем. «Индекс-1200» - это многослойный полукombineзон и куртка с капюшоном с обзорным двухслойным стеклом и светофильтром. Дыхательный аппарат находится внутри костюма и располагается на спине.

Основные технические характеристики костюмов «МЕЧТА», «Индекс-1» и «Индекс-1200» приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Основные технические характеристики термостойких противотепловых костюмов предприятия «Индекс»

Показатель	Значение показателя костюмов		
	«МЕЧТА»	«Индекс-1»	«Индекс-1200»
1. Температурный интервал эксплуатации, °С	-30...+200	-50...+200	-50...+1200
2. Стойкость к влиянию температуры окружающей среды, с, не менее	до 300 °С - 150 до 200 °С - 240	200 °С - 900	1200 °С - 300 200 °С - 1200
3. Стойкость к влиянию теплового лучезарного потока, с, не менее	5 кВт/м <sup>2</sup> - 240 40 кВт/м <sup>2</sup> - 5	40 кВт/м <sup>2</sup> - 30 18 кВт/м <sup>2</sup> - 900 10 кВт/м <sup>2</sup> - 1200	40 кВт/м <sup>2</sup> - 600 20 кВт/м <sup>2</sup> - 1200
4. Стойкость к контакту с нагретыми поверхностями, с, не менее	400 °С - 30	400 °С - 5	1200 °С - 10
5. Стойкость к влиянию открытого пламени, с, не менее	15	20	300
6. Водопроницаемость	водонепроницаемый	водонепроницаемый	водонепроницаемый
7. Морозоустойчивость, °С	-40	-50	-50
8. Масса, кг, не более	2,5	4,5	12,0

На основе проведенных исследований научно-производственным разработкам термостойкий костюм «Индекс-1200», который по своим техническим характеристикам не имеет аналогов в мире.

Имеются на оснастке подразделений пожарной охраны теплоотражающие и теплозащитные костюмы морально устарели, имеют достаточно ограниченные сроки защитного действия, область применения и, естественно, не отвечают современным требованиям к безопасности пожарных при гашении пожаров и ведении аварийно-спасательных работ в условиях высоких температур.

В то же время, разработанная фирмой термостойкая одежда имеет хорошие показатели по теплофизическим характеристикам, однако они получены, в основном, при испытаниях материала одежды без присутствия в нем человека, то есть без учета санитарных норм при теплофизических процессах, которые происходят в подкостюмном пространстве в результате теплопередачи с внешней среды, выделение метаболической теплоты организмом человека и теплоотвода путем испарения пота, а, следовательно, значения показателей костюмов, приведенные в табл.6.5, является завышенными для нормативов допустимой длительности работы пожарных.

Подтверждением вышеизложенного является тот факт, что при показательных испытаниях костюмов «Индекс-1200» в г. Северодонецке и в г. Луганске в условиях температуры окружающей среды около 40 °С и влияния теплового излучения от пламени пожара при имитации закрытия задвижки нефтепровода использовались замороженные водяные элементы ОЭ-2, разработанные НИИГД «Респиратор».

Ориентировочные нормативы допустимой длительности работы пожарных в ТВК и ТЗК (см. подраздел 6.3) в зависимости от категории работ: средней тяжести и тяжелой с начальной достаточно низкой температурой окружающей среды (15...19) °С получены при испытаниях на семи добровольцах - пожарных.

Опыты в костюмах производили вблизи границы с пламенем на расстоянии (1...5) м с кратковременным заходом в пламя, на (10...15) с. Параметры пламени: высота огня (4...5) м, его площадь (6...22) м<sup>2</sup>. Тепловой лучистый поток составил (3,5...6,9) кВт/м<sup>2</sup>, а температура окружающей среды (50...650) °С (в пламени свыше 800 °С).

К началу и после исследований в испытуемых определяли: массу тела, температуру в подмышечной впадине, ректальную температуру, температуру кожи в 5-ти точках (лоб, грудь, кисть, бедро, стопа ноги), частоту пульса, артериальное давление, силу и выносливость. В итоге получены завышенные значения длительности работы пожарных, которые в дальнейшем были уменьшены, однако, без научного обоснования.

При исследованиях выяснили, что влияние теплового лучистого потока и пламени (особенно при попадании сгоревшего продукта со следующим догоранием) вызывает снижение теплозащитных свойств и в ряде случаев нарушения целостности теплоотражающих и теплозащитных свойств костюмов

(обгорание металлизации, разрушения теплоизоляции, изменение цвета материалов, потеря механической прочности).

Теоретическое исследование по определению безопасной длительности работы в спецодежде, ТВК и ГЗК, которые находятся на оснащении подразделений пожарной охраны, не проводились.

В связи с вышеизложенным, необходимо раскрыть закономерность нестационарных процессов теплообмена организма пожарных и обосновать на этой основе параметры защитной одежды, которые обеспечат безопасность ведения пожарно-спасательных работ.

### 6.3. Математическая модель нестационарного процесса переноса теплоты в изолирующей одежде с системой охлаждения и без нее

Общая методика исследований заключается в следующем. Как и для горноспасателей (см. 3.2 раздела 3.1), рассмотрим наиболее общую систему «окружающая среда - защитная одежда - организм пожарного - физическая нагрузка». Две составных системы: окружающая среда и физическая нагрузка являют собой эрготермические нагрузки, которые влияют на тепловое состояние организма пожарного, первая из которых характеризуется такими параметрами, как температура, влажность и скорость воздуха, тепловой лучистый поток, непригодность для дыхания является независимой от пожарного фактором, вторая - зависит от вида и условий ведения работ, то есть от скорости передвижения, массы снаряжения и дополнительного груза, высоты преодоленного участка, направления и угла наклона движения, и подразделяется на легкую, средней тяжести, тяжелую и очень тяжелую.

В отличие от существующей классификации физической нагрузки для пожарных рассматривается как категория «очень тяжелая нагрузка», которую учитывали ранее только при движении вверх по вертикальным лестницам, обоснование которого будет дано в результате исследований их энергозатрат в зависимости от вида и условий выполнения работ. При этом принимаем, как и для горноспасателей, что степень тяжести работы пожарных определяется следующим изменением диапазона энергозатрат: 160 Вт (отдых в респираторе) - легкая, свыше 160 до 320 Вт – средняя, свыше 320 до 480 Вт – тяжелая, свыше 480 Вт – очень тяжелая.

Третья составная системы - защитная одежда подразделяется на изолирующую (теплоотражающую и теплозащитную), неизолирующую от внешней среды (защитную одежду) с пассивным теплосъемом, что находится на оснащении подразделений пожарной охраны, и изолирующую с активным теплосъемом (охлаждением), которая должна быть разработана и находиться на оснащении. Термин «изолирующая» одежда (костюм, комбинезон) имеет в виду, что он защищает от теплового влияния всю поверхность тела пожарного и препятствует влиянию на него влажности и скорости движения окружающего воздуха.

Для изолирующей одежды использование активного теплосъема (ох-

лаждение организма пожарного) является общим случаем. Причем, необходимо выбрать наиболее простые, надежные и дешевые способы теплосъема, систему охлаждения и хладагент с учетом пропорционального теплосъема из разных участков тела пожарного, конструкции теплоизолирующей оболочки одежды: количества, расположения, теплофизических характеристик слоев и воздушных прослоек, а также нестационарных процессов теплообмена организма пожарного в одежде при эрготермических нагрузках.

В данном случае необходимо обосновать критерий теплового состояния организма пожарного – температуру пододежного пространства, которая будет сравниваться с санитарными нормами, и тем же определяться безопасная длительность его работы. Это дает возможность существенно снизить расходы на проведение экспериментальных исследований, не определяя при этом трех физиологических параметров: температур тела (ректальной) и кожи, частоты сердечных сокращений.

При исследовании теплового состояния организма пожарного в неизолирующей одежде тепловой баланс необходимо определять с учетом всех параметров окружающей среды, конструкций теплоизолирующей оболочки, термических ее сопротивлений и физиолого-гигиенических параметров: температур тела, кожи, частоты сердечных сокращений и потовыделения (четвертая составляющая системы).

Наружный слой костюма – водонепроницаемый, тыльная сторона выполнена из теплоотражающего, термостойкого, а лицевая – термостойкого материала. Под внешним теплоотражающим слоем находится объемный теплоизолированный слой ватина, а под ним сатиновая подкладка. Рабочая сторона ладони защищена тонким слоем войлока. На руку надевается тонкая сатиновая рукавица, на тыльной стороне которой закрепленная ампула из тонкой прорезиненной ткани. Ампула покрывает всю тыльную сторону, внутри которой размещен охлаждающий элемент ОЭ-2 (в области предплечья к основе большого пальца) и половина охлаждающего ОЭ-2 (в области кисти), секции которого развернуты на 90 °С относительно направления кисти пальцев для сохранения ее гибкости при работе.

Теплоотражающая поверхность и объемная теплоизоляция защищает тыльную сторону руки, а именно она во время работы пожарного свернута, в основном, к очагу пожара, должна быть защищена от теплового излучения. В первую очередь тают пластины льда на снаружи кисти, а потом образованная вода при контакте из ОЭ-2 охлаждает их.

Схема изолирующего костюма с аналогичной системой охлаждения для горноспасателей приведена на рис.3.7 (см. подраздел 3.1).

При необходимости более длительной работы полуторный ОЭ-2 в ампуле рукавицы может быть быстро заменен новым замороженным. В зависимости от температуры окружающей среды возможен быстросменяемый вариант рукавиц.

Для охлаждения стоп ног используем вышеприведенную водоледную систему.

В отличие от принципа охлаждения стоп ног горноспасателя предлага-



ется проводить замораживание воды в системе «охлаждающий карман - трубка - стелька» сначала в морозильной установке, которая позволит увеличить срок защитного действия ног пожарного, а, следовательно, длительность ведения пожарно-спасательных работ при эрготермических нагрузках.

Для этого необходимо исследовать процессы теплообмена пожарного в защитной одежде с водоледающей системой охлаждения и, в частности без нее, в зависимости от окружающей среды и энергозатрат при выполнении разного вида работ.

Кроме этого, при расчете допустимого количества хладагента для отвода теплоты и теплопередачи сквозь многослойную оболочку костюма горноспасателей принимаются ограниченное количество, расположение, теплоемкость тонких слоев ткани и воздушных прослоек между ними, не превышающее четырех.

Это приводит к существенным погрешностям в расчетах, результаты которых в дальнейшем корректируются в направлении уменьшения массы хладагента и увеличения времени защитного действия после получения данных физиологического состояния горноспасателей:

- частоты сердечных сокращений;
- ректальной температуры;
- кожной температуры.

Эти испытания достаточно трудоемки и проводятся в тепловой камере.

В связи с этим, рассмотрим наиболее общую расчетную схему системы "окружающая среда - защитная одежда - человек" с минимально возможным количеством слоев теплоизолированной оболочки одежды пожарных, представленную на рис. 6.1 [12,16].

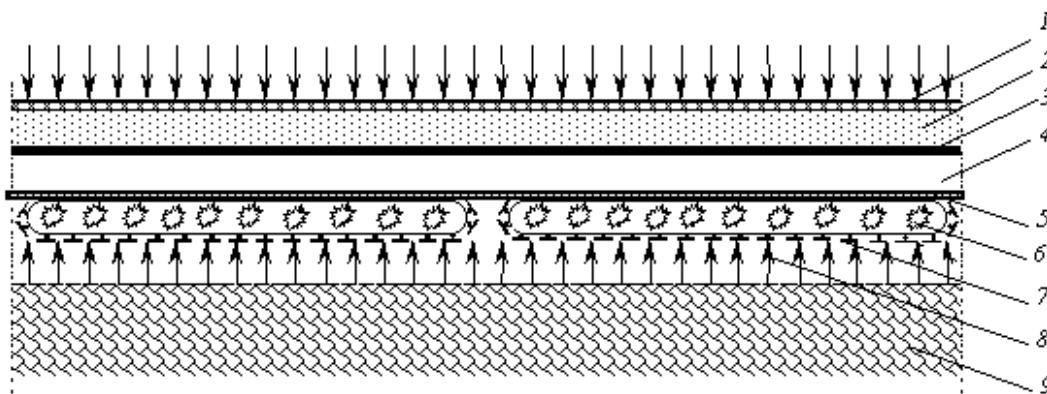


Рис. 6.1. Расчетная схема системы «окружающая среда – защитная одежда – человек»: 1 – внешний слой; 2 – внутренний слой; 3 – подкладка; 4, 8 – воздушная прослойка; 5 – внутренний костюм; 6 – охлаждающий элемент; 7 – решетчатый карман; 9 – тело человека

Защитная изолирующая одежда, как правило, должна состоять из внешнего и внутреннего (легкого) костюмов. В свою очередь внешний кос-

твом состоит из внешнего слоя 1 (термостойкий материал); внутреннего слоя 2 (теплоизоляционный легкий материал - синтепон); слою 3 (подкладка - сатин, бязь), а внутренний - из слоя 5 (комбинированная ткань). На внутренней поверхности слоя 5 в решетчатый карманах 7 расположен хладагент 6 (водо-ледяные охлаждающие элементы ОЕ-2, которые используются для противотепловой одежды горноспасателей). Между слоями 3 и 5, а также карманами 7 и телом человека 9 находятся воздушные прослойки 4 и 8.

Стрелками показанные направления тепловых потоков с окружающей среды и от тела человека. Так как рассматривается изолирующая термостойкая внешняя оболочка, то в данном случае не учитывается влияние на теплообмен в подкостюмном пространстве влажности и скорости воздуха окружающей среды.

Нестационарные процессы теплопередачи через многослойную оболочку от окружающей среды в подкостюмное пространство, моделируются дифференциальным уравнением:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2}, \quad (6.1)$$

- где  $\rho_i$  – плотность  $i$ -го слоя среды (воздуха, воды, материала костюма),  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $c_i$  – теплоемкость  $i$ -го слоя среды (воздуха, воды, материала костюма),  $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;  
 $\lambda_i$  – теплопроводность  $i$ -го слоя среды (воздуха, воды, материала костюма),  $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$ ;  
 $T_i$  – температура в пределах  $i$ -го слоя расчетной схемы,  $T_i = T_i(x)$ ;  
 $\tau$  – время с момента теплового влияния, с;  
 $x_i$  – пространственная координата в пределах  $i$ -го слоя или прослойки, которая считается от внешней поверхности слоя (прослойке), м.  
 Как начальное условие для уравнения (6.1) используется

$$T_i(x, 0) = T_0, \quad (6.2)$$

где  $T_0$  - начальная температура,  $T_0 = 293 \text{ K}$ .

Теплообмен на границе костюма (внешней поверхности слоя 1) представим предельным условием третьего рода

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_1 [T_1(0, \tau) - T_c], \quad (6.3)$$

где  $\alpha_1$  – суммарный коэффициент конвективно-лучезарного теплообмена между окружающей средой и внешним слоем,  $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ .

$$\alpha_1 = \alpha_{1к} + \sigma(T_1 + T_c)(T_1^2 + T_c^2), \quad (6.4)$$

где  $\alpha_{1к}$  – коэффициент конвективного теплообмена между окружающей средой и внешним слоем, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T_c$  – температура окружающей среды (принята константой), К.

На границах между слоями 1-2, 2-3, 3-4 и 4-5 задаются предельные условия четвертого рода:

$$T_i(\delta_i, \tau) = T_{i+1}(0, \tau); \quad \lambda_i \frac{T_i(\delta_i, \tau)}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{T_{i+1}(0, \tau)}{\partial x}; \quad (i = 1 \dots 4). \quad (6.5)$$

На нижней границе последнего слоя одежды 5 так же, как и на внешнем слое, задается предельное условие третьего рода:

$$\lambda_5 \frac{\partial T_5(\delta_5, \tau)}{\partial x} = \alpha_5 [T_8(\delta_8, \tau) - T_5(\delta_5, \tau)], \quad (6.6)$$

где  $\alpha_5$  – суммарный коэффициент конвективного и лучезарного теплообмена между нижним слоем внутреннего костюма и подкостюмным пространством 8, Вт/(м<sup>2</sup>·К), определяется аналогично по формуле (6.4) при значениях переменных, которые входят у нее для 5-го слоя.

Температура  $T_{л}$ , К, в подкостюмном пространстве формируется в результате взаимодействия двух тепловых потоков, которые смешиваются здесь, а именно, который поступает от внешней среды  $\tilde{Q}_c$ , и  $\tilde{Q}_T$  от тела человека, Вт. Поэтому тепловой поток, который поглощается ОЭ-2,  $\tilde{Q}_л$  равняется сумме отмеченных тепловых потоков

$$\tilde{Q}_л = \tilde{Q}_c + \tilde{Q}_T. \quad (6.7)$$

Этот тепловой поток зависит от скорости передвижения границе «лед-вода» и количества теплоты, затрачиваемой на изменение агрегатного состояния льда. В данных исследованиях эту зависимость считаем пропорциональной коэффициенту конвективного теплообмена между льдом и подкостюмным пространством  $\alpha_{л}$  и разницы между температурой льда  $T_8$ , и температурой в подкостюмном пространстве  $T_{л}$ :

$$\tilde{Q}_л = \alpha_{л} S_{л} (T_8 - T_{л}), \quad (6.8)$$

где  $S_{л}$  – площадь поверхности льда, м<sup>2</sup>.

С учетом (6.6-6.8) уравнения теплового баланса в подкостюмном пространстве примет вид:

$$\alpha_{\text{л}} \frac{S_{\text{л}}}{S_{\text{к}}} (T_8 - T_{\text{л}}) = \alpha_5 [T_5(\delta_5, \tau) - T_8] + \frac{\tilde{Q}_{\text{т}}}{S_{\text{к}}}, \quad (6.9)$$

где  $S_{\text{к}}$  – площадь поверхности костюма,  $\text{м}^2$ .

Таким образом, теплопередача от окружающей среды и тела человека в подкостюмное пространство моделируется дифференциальным уравнением (6.1) с начальным условием (6.2) и предельными условиями (6.3), (6.5) и (6.9).

В начале рассмотрим предельное (постоянное) распределение температуры, которая возникает в слоях костюма и подкостюмном пространстве после окончания длительного промежутка времени ( $\tau \rightarrow \infty$ ). В этом случае исходное уравнение (6.1) превратится в стационарный вид (с нулевой правой частью) и температура зависит только от пространственной координаты, а мощность теплового потока, который проникает с окружающей среды, – постоянная во всех слоях костюма:  $Q_{\text{с}} = \text{const}$ . В результате интегрирования (1.1) по пространственной переменной, с учетом предельных условий получим решение:

$$T_1(0) = T_{\text{с}} - \frac{Q_{\text{с}}}{\alpha_1 S_{\text{к}}}; \quad T_{i+1}(0) = T_i(0) - \frac{Q_{\text{с}} \delta_i}{\lambda_i S_{\text{к}}}, (i = 1..4); \quad T_5(\delta_5) = T_8 + \frac{Q_{\text{с}}}{\alpha_5 S_{\text{к}}}. \quad (6.10)$$

После суммирования обеих частей уравнения (6.10) тепловой поток, который проникает с окружающей среды в подкостюмное пространство, определяется таким образом:

$$Q_{\text{с}} = S_{\text{к}} (T_{\text{с}} - T_8) \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к}}} + \frac{1}{\alpha_5} \right). \quad (6.11)$$

Для удобства дальнейшего изложения введенные обозначения:  $\frac{\delta_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к}}} = \sum_{i=1}^5 \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ ; индекс «1» внешней поверхности оболочки костюма заменен на индекс «н»; индекс «5» внутренней поверхности оболочки костюма (внутреннего костюма) – на индекс «в»; индекс «8» воздушной прослойки между телом человека и оболочкой костюма (подкостюмное пространство) – на индекс «п».

С целью получения решения нестационарной задачи теплопередачи, правую часть исходного уравнения (6.1) представим в конечных разностях, в результате уравнение превратится к следующему:

$$\frac{dT}{d\tau} = a_{\text{к}} \frac{T_{\text{н}} - 2T + T_{\text{к}}}{\delta_{\text{к}}^2}, \quad (6.12)$$

где  $a_k$  – температуропроводность оболочки костюма,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$T = T(\tau)$  – средняя температура внутри оболочки костюма (из первого по пятый слой), К;

$$a_k = \frac{\lambda_k}{\rho c}; \quad \lambda_k = \frac{\sum_{i=1}^5 \delta_i}{\sum_{i=1}^5 \delta_i / \lambda_i}; \quad \rho = \frac{\sum_{i=1}^5 \rho_i \delta_i}{\sum_{i=1}^5 \delta_i}; \quad c = \sum_{i=1}^5 c_i / 5 - \text{константы};$$

$T_H = T_1(0, \tau)$  и  $T_K = T_5(\delta_5, \tau)$  – температура внешней и внутренней поверхностей оболочки костюма, соответственно.

После представления левых частей предельных условий (6.3) и (6.6) в конечных разностях, с учетом (6.9), получим:

$$T_H = A_1 + B_1 T; \quad T_K = A_2 + B_2 T, \quad (6.13)$$

$$\text{где} \quad A_1 = \frac{1}{1 + \bar{\lambda}_H} T_c; \quad B_1 = \frac{\bar{\lambda}_H}{1 + \bar{\lambda}_H}; \quad \bar{\lambda}_H = \frac{2\lambda_k}{\delta_k \alpha_1};$$

$$A_2 = \frac{\bar{\alpha}_L T_L + \bar{Q}_T}{(1 + \bar{\alpha}_L) \bar{\lambda}_K + \bar{\alpha}_L}; \quad B_2 = \frac{(1 + \bar{\alpha}_L) \bar{\lambda}_K}{(1 + \bar{\alpha}_L) \bar{\lambda}_K + \bar{\alpha}_L}; \quad \bar{\alpha}_L = \frac{\alpha_L S_L}{\alpha_5 S_K}; \quad \bar{\lambda}_K = \frac{2\lambda_k}{\delta_k \alpha_5};$$

$$\bar{Q}_T = \frac{\tilde{Q}_T}{\alpha_5 S_K},$$

при этом зависимость температуры в подкостюмном пространстве имеет вид

$$T_\Pi = T_8 = \frac{T_K + \bar{\alpha}_L T_L + \bar{Q}_T}{1 + \bar{\alpha}_L} = A_3 + B_3 T, \quad (6.14)$$

$$A_3 = \frac{(\bar{\alpha}_L + \bar{Q}_T)(1 + \bar{\lambda}_K)}{(1 + \bar{\alpha}_L) \bar{\lambda}_K + \bar{\alpha}_L}; \quad B_3 = \frac{\bar{\lambda}_K}{(1 + \bar{\alpha}_L) \bar{\lambda}_K + \bar{\alpha}_L}.$$

После подстановки (6.13) в (6.12) нестационарное уравнение примет вид:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{a_k}{\delta_k^2} [A_1 + A_2 - (2 - B_1 - B_2)T], \quad (6.15)$$

а начальное условие

$$T(0) = T_0. \quad (6.16)$$

Решение уравнения (6.15) с учетом (6.16) имеет вид

$$T = T_\infty - (T_\infty - T_0)e^{-k_2 \cdot \tau}, \quad (6.17)$$

где  $T_\infty$  – температура внутри оболочки костюма при постоянном режиме, К;

$k_2$  – параметр скорости изменения температуры между верхним слоем оболочки костюма 1 и внутренним слоем 5.

В соответствии с (6.8) и (6.14) холодопродуктивность системы

$$\tilde{Q}_л = \alpha_л S_л (A_3 + B_3 T - T_л). \quad (6.18)$$

Поскольку температура в подкостюмном пространстве впоследствии повышается, то согласно (6.18) скорость таяния льда увеличивается вплоть до полного его использования. На основании полученных формул (6.13), (6.14) и (6.17), моделировали динамику температуры на границах оболочки костюма и в подкостюмном пространстве в зависимости от теплофизических свойств материала оболочки, температуры окружающей среды и мощности тепловых потоков, вычисляли ее максимальные значения после окончания длительного промежутка времени ( $\tau \rightarrow \infty$ ), когда наступает стационарный тепловой режим. Один из вариантов расчета представлен в табл. 6.6. Расчеты производили при следующих исходных данных:

$$T_c = 373 \text{ K} (100^\circ \text{C}); S_k = 4 \text{ м}^2; \delta_k = 0,01 \text{ м}; \\ \lambda_k = 0,035 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \alpha_n = 4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Таблица 6.6

Результаты расчета постоянных температур  
внутри оболочки костюма

$T_b, \text{ K}(^\circ\text{C})$	$T(\infty), \text{ K}(^\circ\text{C})$	$T_n, \text{ K}(^\circ\text{C})$	$T_k, \text{ K}(^\circ\text{C})$	Примечание
355,5(82,5)	345,8(72,8)	336,0(63,0)	302,0(29,0)	С применением хладагента ( $Q_x = 530 \text{ Вт}$ )
367,5(94,5)	364,6(91,6)	361,7(88,7)	351,7(78,7)	Без применения хладагента ( $Q_x = 0 \text{ Вт}$ )

Допустимую температуру в подкостюмном пространстве принимали

равной  $T_{\text{п}}(\infty) = 302 \text{ K} (29^\circ \text{C})$ , а температуру льда  $T_{\text{л}} = 273 \text{ K} (0^\circ \text{C})$ . При этом тепловой поток с окружающей среды  $Q_{\infty} = 274 \text{ Вт}$ , а теплопродукцию организма человека –  $Q_{\text{T}} = 256 \text{ Вт}$  при ведении работ средней тяжести.

В итоге ожидаемая постоянная температура внутри слоев одежды при применении хладагента  $T_{\infty} = 345,8 \text{ K} (72,8^\circ \text{C})$ , а после его использования  $T_{\infty} = 364,6 \text{ K} (91,6^\circ \text{C})$ .

Соответственно из (6.18) можно рассчитать тепловые потоки при таянии льда в начальный момент времени ( $\tau = 0$ ) и после достижения стационарного режима ( $\tau = \infty$ ), а потом определить необходимый запас льда  $M_{\text{л}}$ , кг на заданный период времени по формуле

$$M_{\text{л}} = [Q_{\infty} \tau - (Q_{\infty} - Q_0) / (k_2 \cdot e^{k_2 \cdot \tau})] / q_{\text{л}}, \quad (6.19)$$

где  $q_{\text{л}}$  – удельный запас холода льда, Дж/кг.

Если запас льда известен, то решая (6.19) относительно  $\tau$  с помощью любого итерационного метода решения нелинейных уравнений, можно определить время защитного действия системы охлаждения  $\tau_{\text{р}}$  (в период таяния льда), а время переходного периода  $\tau_{\text{п}}$ , с:

$$\tau_{\text{п}} = 4/k_2 = 4 (2 / (2 - B_1 - B_2)). \quad (6.20)$$

Динамика температуры в подкостюмном пространстве при наличии хладагента через период времени  $\tau_{\text{р}}$  (штриховая линия), а также без его применения приведена на рис. 6.2. Построение графиков производили с использованием приведенных выше исходных данных.

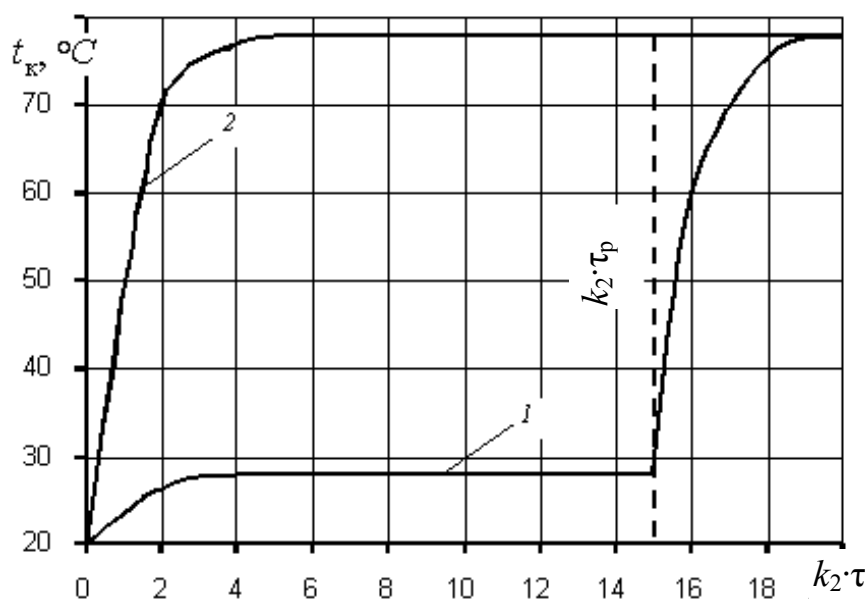


Рис. 6.2 Динамика температуры в подкостюмном пространстве: 1 – при использовании хладагента; 2 – без хладагента

Из рис. 6.2 следует, что динамика температуры в подкостюмном пространстве наблюдается при изменении  $k_{2t}$ , в основном, от 0 до 4, при этом, как и ожидалось, скорость ее нарастания значительно выше в одежде без применения хладагента, а постоянная температура в этом случае (см. табл. 6.6) превышает приблизительно в 2.8 раза температуру в костюме с использованием хладагента.

Таким образом, разработанный аналитический метод позволяет исследовать процессы тепломассопереноса в подкостюмном пространстве с учетом влияния внешней среды, теплового состояния организма человека и фазового перехода в системе охлаждения при разном при различном сочетании и количестве слоев с воздушными прослойками в оболочке костюма. Это предоставляет возможность определить распределение температуры внутри оболочки костюма и время его защитного действия без учета физиологического состояния человека. Поэтому данный метод может быть использован при проектировании средств индивидуальной противотепловой защиты для пожарных при выполнении пожарно-спасательных работ.

#### 6. 4. Тепловой баланс организма пожарного при работе в неизолирующей одежде

Тепловое состояние организма человека зависит от влияния на него ряда факторов окружающей среды и степени тяжести производимой работы (см. подраздел 6.1). В нормальной или умеренно теплой окружающей среде при работе средней тяжести организм человека (пожарного) находится в тепловом равновесии, которое описывается уравнением теплового баланса, который выражается тепловыми потоками при теплообмене между организмом и средой [12]

$$Q_s = Q_t \pm \Sigma(Q_C, Q_{EM}, Q_R, Q_M, Q_p), \quad (6.21)$$

где  $Q_s$  – тепловой поток, который приводит к накоплению теплоты в организме;

$Q_t$  – теплопродукция организма человека (75-85) % от энергозатрат  $Q_M$ ).

Теплопродукция организма человека  $Q_t$  может иметь только положительное значение, а другие составные теплового баланса могут иметь как положительное значение (теплоприток к организму), так и отрицательное (теплоотвод от организма). При увеличении теплового влияния окружающей среды и теплопродукции организма человека равновесие нарушается и на него действует тепловой поток  $Q_s$ , который его нагревает.

В частности, графическая зависимость тепловых потоков от температуры окружающего воздуха (по четырем основным факторам), полученных на базе рассмотренного теплового баланса (6.21), представлена на рис. 6.3.

При расчетах приняты следующие исходные данные:  $Q_M = 320$  Вт,  $v = 0,1$  м/с,  $B = 100$  %,  $\mu = 0,2$ ,  $M = 1,0$  КЛО.



Энергозатраты и теплопродукция человека в результате жизнедеятельности и физической нагрузки не зависят от температуры  $t_c$ , а поэтому являются прямой. Другие функции являются кривыми с разным радиусом кривизны. В связи с тем, что среднее значение средневзвешенной температуры кожи принято равным  $35^\circ\text{C}$ , при повышении температуры воздуха  $t_c$  выше этого значения эти три функции пересекаются в одной точке, потом изменяют свой знак из отрицательного на положительный, а отвод теплоты из организма человека не происходит и накапливается в организме.

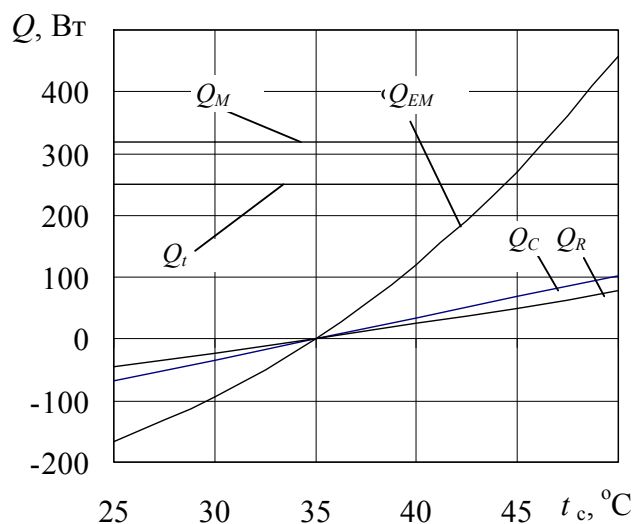


Рис. 6.3. Зависимость тепловых потоков от температуры окружающей среды

Особенность процесса отведения теплоты от тела человека в результате испарения пота заключается в том, что функция  $Q_{EM} = f(t_c)$  в общем случае означает максимально возможное отведение теплоты при заданных значениях температуры воздуха по сухому и мокрому термометрам, а также скорости его движения. Если же теплоприток за счет физической нагрузки полностью или частично компенсируется теплоотводом конвекцией или излучением, то выделение пота уменьшается вплоть до полного его прекращения, хотя физическая нагрузка на человека не снижается. При температуре в диапазоне  $20...35^\circ\text{C}$  теплоотвод за счет испарения пота, оставаясь максимально возможным, уменьшается от максимума к нулю при температуре  $35^\circ\text{C}$ . При выше этой температуры вместо испарения пота происходит конденсация водяных паров из воздуха на поверхность кожи, которая приводит к дополнительному накоплению теплоты в организме.

Практика показывает, что при температуре воздуха в диапазоне  $(27...33)^\circ\text{C}$ , риск теплового травматизма человека выше, чем при  $40...50^\circ\text{C}$ . Это объясняется тем, что  $\tau = f(t_c)$  представляет собой гиперболу и в области умеренно повышенной температуры воздуха  $(27...33)^\circ\text{C}$  ее увеличение на каждый градус приводит к резкому уменьшению допустимой длительности работы. Поэтому у человека может возникнуть субъективное чувство ошибочного благополучия, которое в итоге может привести к непредвиденному и

опасному перегреванию организма.

Учитывая количественные расхождения между расчетными результатами и экспериментальными данными при определении ПТР, выполнен сравнительный анализ данных, полученных в экспериментальных исследованиях с результатами расчета по двум параметрам, допустимой длительности работы и тепловому потоку  $Q_s$ , направленному в организм испытуемого и теплоты, которая приводит к ее накоплению в нем. Исходные данные для расчета приняты такие, как и в экспериментах: относительная влажность воздуха  $B = 85 \%$ , скорость движения  $v = 0,1$  м/с, энергозатраты  $Q_M = 340$  Вт. Допустимый прирост средней температуры тела принят равным  $2^\circ\text{C}$ . Расчет выполнен для трех значений коэффициента  $\kappa_1 = 1,0; 0,8$  и  $0,6$ , результаты которого приведены на рис. 6.4. Отсюда видно, что наблюдается удовлетворительное совпадение экспериментальных данных и результатов расчета для диапазона температуры  $(36 \dots 60)^\circ\text{C}$  при коэффициенте  $\kappa_1 = 0,6$  (общее количество опытов в этом диапазоне 22), а для диапазона температур  $(25 \dots 36)^\circ\text{C}$   $\kappa_1 = 0,8$  (6 опытов). При этом большое отклонение наблюдается для температуры  $30^\circ\text{C}$  и особенно –  $35^\circ\text{C}$ , в результате недостаточного числа опытов в этом важном диапазоне и, по-видимому, неминуемых погрешностей, которые возникают в экспериментах при участии людей как испытуемых. Отмеченные сомнения подтверждаются результатами следующих серий экспериментов, анализ которых приведен ниже.

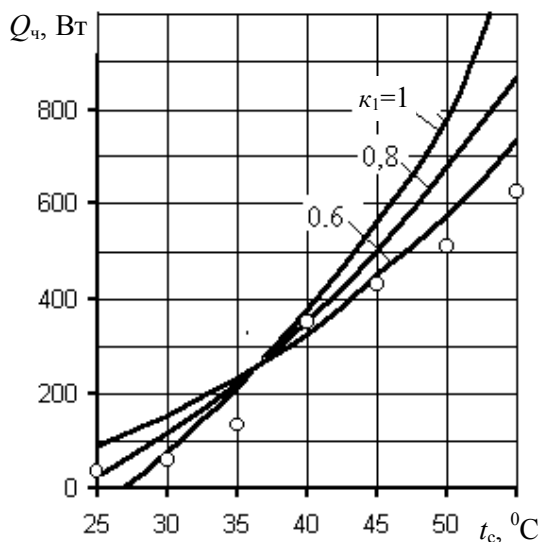


Рис. 6.4. Тепловой поток при разных коэффициентах  $\kappa_1$ :

- — теоретические результаты;  
 ○ — экспериментальные данные

На основании вышеизложенных результатов исследований выберем общий коэффициент  $\kappa_1 = 0,8$  для трех зависимостей (6.25, 6.29, 6.30) в диапазоне температур  $25^\circ\text{C} \leq t_c \leq 36^\circ\text{C}$  и  $\kappa_1 = 0,6$  – для  $36^\circ\text{C} (t_c \leq 60^\circ\text{C})$  со следующим экспериментальным подтверждением правильности выбора.

Как отмечено выше, определение рабочих нормативов для допустимого и предельного прироста СТТ на базе нормативов связано с определенными трудностями, которые заключаются в том, что оптимальные их значения (в экспериментах – исходные) в них принято не как однозначный уровень, а как область температуры от 34,9 до 36,2 °С с разницей 1,3 °С.

Такой разбег подтверждается и реальными наблюдениями: в экспериментах исходная СТТ для шести испытуемых после статистической обработки была равной  $(35,9 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ .

Результаты других экспериментальных исследований показывают, что фактическая СТТ часто выходит за пределы отмеченного выше официально-го диапазона как влево, так и вправо.

Ранее была впервые сделанная попытка ввести в математическую модель и в программу, которая базируется на ней, отсутствующую составляющую теплового баланса – влияние дыхания в аппарате с химически связанным кислородом типа РХ. Согласно принятым в этой работе исходным данным респиратор РХ-4П при температуре окружающего воздуха 30 °С обеспечивает прирост ГТР в сравнении с респиратором с нейтральным микроклиматом (Р-30) на 28 %. Однако этот прирост с повышением температуры окружающей среды до 40 °С уменьшается до 6 %.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при температуре воздуха (30...35) °С респиратор с химически связанным кислородом, который используется в подразделениях пожарной охраны, в сравнении с респиратором с нейтральным микроклиматом позволяет увеличить ГТР не менее чем на 15 %.

## 6.5. Экспериментальные исследования энергозатрат и теплового состояния организма пожарных в защитной одежде

### 6.5.1. Методика проведения исследований

Основными составляющими теплового баланса, от которых зависит длительность работы человека, является внутренняя энергия, которая производится его организмом, – теплопродукция  $\Phi_{\text{ч}}$ , которая в свою очередь зависит от энергозатрат  $\Phi_{\text{м}}$ , и внешняя энергия, которая проникает извне. При этом внешняя энергия, как правило, является независимым от человека фактором, в то время как внутренняя зависит от многих параметров.

Исследованием энергозатрат организма горноспасателей посвящены работы [5,19], в которых проанализировано влияние разных видов выполняемых операций и условий их выполнения.

Условия работы пожарных при выполнении пожарно-спасательных работ в наземных условиях существенно отличаются от соответствующих условий горноспасателей, как будет показано ниже, а, следовательно, другими будут и энергозатраты их организма. При этом следует отметить, что степень тяжести «очень тяжелая» характеризует только движение пожарного вверх по вертикальной лестнице.

В связи с этим, целью исследований является определение зависимостей энергозатрат организма пожарных от вида и условий выполнения пожарно-спасательных работ.

Переменными величинами приняты следующие параметры: масса груза, скорость движения, высота прохода преодолеваемого участка, угол наклона и направление движения (наверх или вниз). Для проведения испытаний использовали стенды «Беговой мостик» и «Бесконечная лестница» теплового комплекса, а также опытно-экспериментальный полигон НИИГД «Респирактор», что позволяют варьировать перечисленными параметрами.

Исследования проводили при выполнении определенного набора упражнений в изолирующих противогазах в лабораторных и полигонных условиях.

В процессе выполнения упражнений проводили хронометраж, а определение энергозатрат осуществляли при физиологических исследованиях газообмена организма испытуемого с учетом многообразия возможных видов работ разной интенсивности при тушении пожаров и спасения людей.

В качестве критерия допустимой физической нагрузки принято увеличение частоты сердечных сокращений до  $150 \text{ мин}^{-1}$ .

Для проведения исследований избраны следующие виды упражнений [12]:

- ходьба медленная по горизонтальной поверхности со скоростью  $(3,0 \dots 3,5) \text{ км/ч}$ ;
- ходьба ускоренная по горизонтальной поверхности со скоростью  $(4,0 \dots 4,5) \text{ км/ч}$ ;
- ходьба быстрая по горизонтальной поверхности со скоростью  $(5,0 \dots 5,5) \text{ км/ч}$ ;
- бег ускоренный по горизонтальной поверхности со скоростью  $(6,5 \dots 7,5) \text{ км/ч}$ ;
- движение по горизонтали при высоте прохода 1,5 м;
- ползание на коленях;
- ползание через узкий проход высотой 0,5 и 0,7 м;
- подъем и спуск по вертикальной лестнице;
- подъем и спуск по маршам внутренней лестницы под углом  $30^\circ$ ;
- подъем по лестнице под углом  $45^\circ$ ;
- перенос груза массой 10 и 30 кг по горизонтальной поверхности;
- подъем и спуск с грузом массой 30 кг по маршам внутренней лестницы под углом  $30^\circ$ ;
- подъем и спуск с грузом массой 10 и 30 кг по лестнице под углом 45 и  $65^\circ$ ;
- перенос потерпевшего на носилках двумя испытуемыми по горизонтальной поверхности;
- подъем и спуск потерпевшего на носилках двумя испытуемыми по маршам внутренней лестницы под углом 30 и  $45^\circ$ ;
- подъем и спуск потерпевшего на носилках по лестнице под углом  $45^\circ$ .

Исследования проводили при участии пожарных-газодымозащитников, которые имеют опыт работы в кислородно-изолирующих противогазах и ведения пожарно-спасательных работ.

Всего для постоянного участия в исследованиях было отобрано семь пожарных, которые отличались один от другого антропологофизиологическими показателями, возрастом и стажем работы в пожарной охране.

Перед проведением исследований испытуемых опрашивали о самочувствии, взвешивали, измеряли их рост и жизненную емкость легких, а также оценивали физическую работоспособность с помощью Гарвардской шаговой пробы.

Исследования проводили в утреннее время через (1,5...2,0) часа после приема еды, чтобы нивелировать специфически динамическое влияние ее приема.

После (15...20) мин отдыха проводили измерение физиологических показателей (потребление кислорода, выделения диоксида углерода, легочную вентиляцию, частоту дыхания, ЧСС и артериальное давление).

После этого испытуемый надевал спецодежда, противогаз (без включения у него) и выполнял упражнения. Длительность упражнений составляла 10 мин или время, необходимое для подъема по маршевой лестнице. Исследование подъема по лестнице под углом 45 и 65° осуществляли на стенде «Бесконечную лестницу», на котором перед началом опыта устанавливали необходимый угол подъема. Скорость движения подбирали методом предыдущих проб при участии испытуемого.

Исследования энергозатрат при движении по ленте и переносе груза по горизонтальной поверхности и под углом проводили на стенде «Дорожка, которая движется». Перед каждым испытанием устанавливали необходимую скорость ленты, после чего испытуемый начинал движение.

В течение времени выполнения упражнений делали отбор проб выдыхаемого воздуха для исследования газообмена и определяли частоту дыхания. По окончании упражнения, в начале и следующего упражнения, определяли ЧСС.

В течение одного дня проводили 3-4 опыта, которые повторялись через (20...50) мин, после полного возобновления физиологических показателей.

Исследования газообмена испытуемых осуществляли при дыхании сквозь дыхательную систему, которая состоит из гофрированных шлангов, клапанной коробки и маски. Шланг выдоха был соединен с модернизированным газовым счетчиком фирмы «Меди», оборудованным суммирующим устройством, что позволяет определять объем легочной вентиляции за любой промежуток времени в течение опыта. Из газового счетчика воздух попадал в дыхательный мешок.

С целью имитации условий дыхания в кислородных противогазах, шланг вдоха был оборудован специальной диафрагмой, которая создает совместно со шлангом соответствующее сопротивление дыханию.

Для исследования влияния на организм дыхания в противогазе в шланг выдоха был вмонтированный волюметр, что позволяет определять минутный

объем дыхания, а пробы выдыхаемого воздуха отбирали через штуцер в мешок Дугласа, присоединенного к шлангу выдоха.

Пробы воздуха анализировали с помощью газоанализатора Орса и газовых часов. Определяли содержимое кислорода и диоксида углерода.

По этим данным на основе известных методик рассчитывали газообмен (потребление кислорода), и через калориметрический эквивалент – энергозатраты испытуемого.

Все полученные экспериментальные данные были сгруппированы в соответствии с задачами исследований и подвержены обработке методами математической статистики для определения средних величин и их оценок.

Основной целью исследований теплового состояния организма пожарных в изолирующей одежде является определение основного значения параметра ее технической характеристики – времени защитного действия (длительности работы) при выполнении заданных видов работы и соответствующих температурно-климатических условиях, а также подтверждение этого параметра, полученного в результате теоретических исследований.

Испытания проводили в тепловой камере и на опытно-экспериментальном полигоне НИИГД «Респиратор», оборудование и аппаратура которых аттестованные, при участии трех испытуемых-добровольцев пожарных в возрасте от 25 до 40 лет со стажем работы не менее 3 лет, которые принимали участие в тушении пожаров. В тепловой камере определяли длительность работы при влиянии, в основном, температуры окружающего воздуха, на полигоне – теплового лучистого потока от пламени пожара.

Защитная одежда состояла из внешнего костюма с термостойким и теплоотражающим материалом, изготовленного предприятием «Индекс», и внутреннего – с водоледяной системой охлаждения – НИИГД «Респиратор», а также с использованием льда на верхней поверхности рук, в стельках стоп ног и без системы охлаждения, то есть только из костюма «Индекс-1». В качестве аппарата для дыхания использовали респиратор типа РС, который находится на оснащении подразделений пожарной охраны.

В тепловой камере исследования проводили при температуре окружающего воздуха  $(100 \pm 1) ^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $(98 \pm 2) \%$ . Перед испытаниями в тепловой камере и на полигоне пожарные проходили медицинский отбор и получали вывод «Пригодный к участию в испытаниях средств индивидуальной противотепловой защиты», изучали условия испытаний и учились работе в одежде.

Предварительно определяли массу испытуемых и одежды на медицинских весах, влияние одежды на подвижность пожарного в оптимальных микроклиматических условиях по самооценке испытуемыми в плане ограничения движений при ходьбе, наклонах туловища, приседаниях, поднятии и отведении в сторону рук и ног, их вращении, приседании и наклонах.

В лабораторных условиях на испытуемых крепили термометры, которые плотно прилегают к внешней поверхности одежды, с максимальной шкалой  $473 \text{ K}$  ( $200 ^\circ\text{C}$ ) и датчики температур в подкостюмном пространстве в области: чела, груди, предплечья, голени, стопы ноги и кисти руки.

Для определения эффективности защиты костюма от теплового лучистого потока при пожаре, испытания проводили на опытно-экспериментальном полигоне. В качестве костров использовали деревянные брусья, положенные в шахматном порядке по периметру площадью  $16 \text{ м}^2$  и высотой 2 м. На высоте 2,2 м от поверхности закрепили две термопары для измерения температуры горения дерева с помощью потенциометра типа МПЩр, отградуированного на максимальную температуру 1773 К ( $1500^\circ\text{C}$ ).

Измерение температуры пододежного пространства и частоты сердечных сокращений проводили с помощью датчиков и аппаратуры, аналогичных при исследованиях в тепловой камере. Для измерения температуры внешней поверхности костюма использовался термометр с максимальной шкалой  $1000^\circ\text{C}$ , закрепленный в области груди.

За время развития пожара испытатели снаряжались самостоятельно в костюм с респиратором, или с помощью другого испытателя, и, одновременно, проводили имитацию тушения пожара порошковым огнетушителем массой 10 кг, что относится к средней категории тяжести работы.

Данные фоновых значений вышеприведенных параметров и после испытаний фиксировали в протоколе, а их обработка осуществлялась так же, как и при испытаниях в тепловой камере.

При кратковременных работах параметры подкостюмного микроклимата не должны выходить за пределы, отмеченных в табл. 6.3.

#### 6.5.2. Определение энергозатрат и тяжести работ пожарных

Результаты исследований энергозатрат  $Q_m$ , Вт, пожарных при движении по горизонтальной поверхности в полный рост в зависимости от скорости движения  $v_d$ , м/мин, потребления кислорода  $q_r$ , л/мин, в штатной экипировке без дополнительного груза, с грузом массой 30 кг и при переносе потерпевших на носилках приведены в табл. 6.7 [21, 22].

Таблица 6.7

Экспериментальные результаты энергозатрат пожарных при передвижении по горизонтальной поверхности в полный рост

$v_d$ м/мин	Без груза		С грузом 30 кг		Перенос потерпевшего	
	$q_r$ , л/мин	$Q_m$ , Вт	$q_r$ , л/мин	$Q_m$ , Вт	$q_r$ , л/мин	$Q_m$ , Вт
35	—	—	—	—	$1,44 \pm 0,21$	467,3
55	$1,10 \pm 0,04$	357,1	$1,62 \pm 0,14$	525,4	$2,21 \pm 0,19$	716,8
71	$1,33 \pm 0,06$	431,4	$1,96 \pm 0,17$	634,3	$2,67 \pm 0,23$	865,4
88	$1,55 \pm 0,07$	503,3	$2,16 \pm 0,16$	700,2	$3,11 \pm 0,23$	1010,0
100	$1,67 \pm 0,06$	543,6	$2,43 \pm 0,19$	787,4	$3,45 \pm 0,20$	1118,6
115	$1,74 \pm 0,05$	564,3	$2,56 \pm 0,21$	830,2	$3,46 \pm 0,22$	1122,4

Энергозатраты определяли по известной зависимости

$$Q_m = 324.5 q_r. \quad (6.22)$$

При этом считали, как и для горноспасателей, что степень тяжести работ пожарных определяется следующим изменением диапазона энергозатрат: 160 Вт (отдых в респираторе) – легкая; свыше 160 до 320 Вт – средняя; свыше 320 до 480 Вт – тяжелая; свыше 480 Вт – очень тяжелую.

По приведенным в табл. 3.4 данным получены аппроксимирующие зависимости (рис. 6.5), которые описываются уравнениями (3.7) (3.8) (3.9).

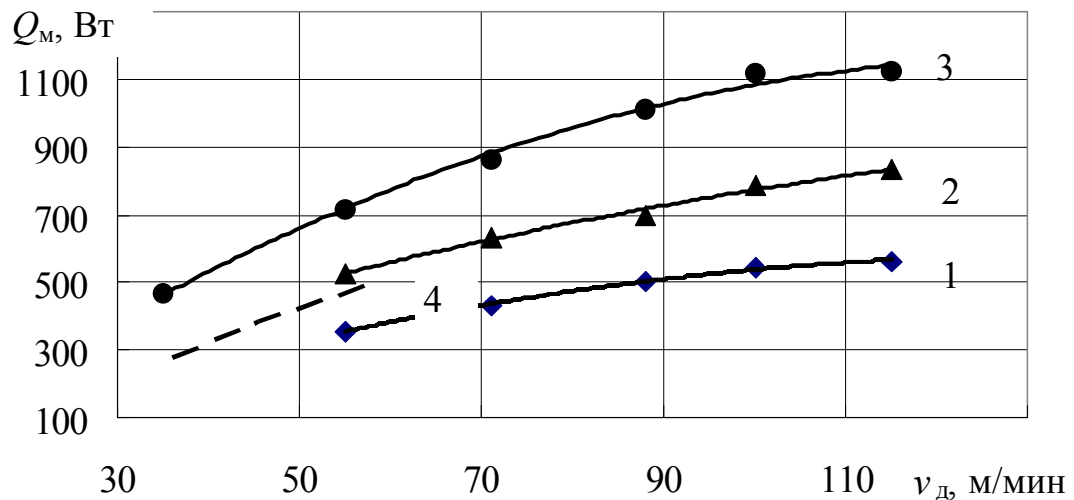


Рис. 6.5. Зависимость энергозатрат членов подразделений пожарной охраны от скорости передвижения по горизонтальной поверхности в полный рост:

- 1 – в экипировке без дополнительного груза; 2 – с грузом 30 кг;  
3 – перенос потерпевшего; 4 – для горноспасателей без дополнительного груза

$$Q_m(1) = -0,0356 v_d^2 + 9,59 v_d - 65,14; \quad (6.23)$$

$$Q_m(2) = -0,0242 v_d^2 + 9,22 v_d + 93,39; \quad (6.24)$$

$$Q_m(3) = -0,0722 v_d^2 + 19,31 v_d - 125,09. \quad (6.25)$$

Уравнения показывают, что имеет место незначительная нелинейность зависимости энергозатрат пожарных от скорости движения без груза и с грузом 30 кг, что подтверждается результатами расчета, значительная – при передвижении с пострадавшим, а их значения меняются от 360 до 1150 Вт. Такие энергозатраты относятся к категориям «тяжелой» и «очень тяжелой» физической нагрузки. При этом отношение энергозатрат горноспасателей (штриховая линия 4) к энергозатратам пожарным в отмеченном



диапазоне при передвижении, в частности, без дополнительного груза, равняется 1,43.

Результаты исследований энергозатрат пожарных при передвижении по проходу ограниченной высоты приведены в табл. 6.8, а полученные зависимости представлены на рис. 6.6. При построении диаграмм на нем за абсциссу принято относительная высота  $H_0$ , рассчитанная за формулой

$$H_0 = h_2 / H_{\max}, \quad (6.26)$$

где  $h_2, H_{\max}$  – реальная и максимальная высота прохода, м.

Таблица 6.8

Экспериментальные данные скорости передвижения, потребления кислорода и энергозатрат пожарных при разной высоте прохода

Высота, $H_{\max}$ , м	Скорость передвижения, $v_d$ , м/мин			Потребление кислорода $q_r$ л/мин			Энергозатраты, $Q_m$ , Вт		
	Без груза	С грузом 30 кг	Перенос потерпевшего	Без груза	С грузом 30 кг	Перенос потерпевшего	Без груза	С грузом 30 кг	Перенос потерпевшего
2.0	55.0	50.0	35.0	1.10	1.64	1.44	357.0	531.4	467.0
1.5	39.4	35.4	15.9	1.30	1.79	1.55	422.8	581.3	502.2
0.7	13.5	11.2	5.2	1.62	2.22	1.71	524.0	719.2	555.9
0.5	5.5	3.7	2.4	1.71	2.35	1.76	554.8	762.2	572.3

При этом принято, что  $H_{\max} = 2$  м, а дальнейшее ее увеличение практически не влияет на скорость передвижения и энергозатраты пожарных.

На рис. 6.5 точки отображают экспериментальные данные, а кривые – аппроксимирующие уравнения, подобранные по этим точкам.

В результате аппроксимации получены следующие зависимости для скорости передвижения и энергозатрат:

$$v_d (1) = 65,315 H_0 - 10,123; \quad (6.27)$$

$$v_d (2) = 61,066 H_0 - 10,902; \quad (6.28)$$

$$v_d (3) = 60,975 H_0^2 - 34,757 H_0 + 8,4688; \quad (6.29)$$

$$Q_m (1) = - 260,95 H_0 + 617,97; \quad (6.30)$$

$$Q_M(2) = -312,24 H_0 + 831,87; \quad (6.31)$$

$$Q_M(3) = -138,84 H_0 + 605,91. \quad (6.32)$$

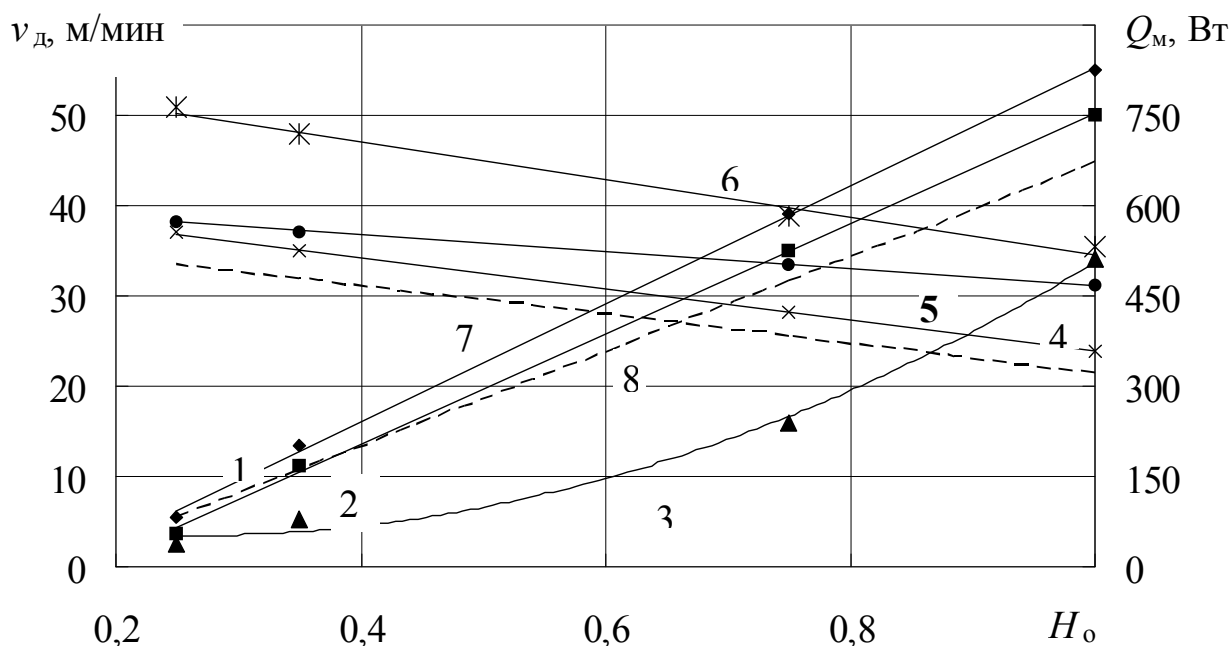


Рис. 6.6. Зависимости скорости передвижения (1-3) и энергозатрат пожарных (4-6) от относительной высоты прохода преодоленного участка

1, 4 — без груза; 2, 6 — с грузом 30 кг;  
 3, 5 — при переносе потерпевшего на носилках;  
 7, 8 — по данным для горноспасателей  
 (без дополнительного груза).

Из уравнений (6.38-6.43) и рис. 6.6 следует, что только при переносе потерпевшего на носилках двумя пожарными скорость каждого из них нелинейно изменяется от высоты прохода, а энергозатраты принимают значение от 362 до 520 Вт, которые относятся к категории «тяжелой» и «очень тяжелой» физической нагрузки. При этом максимальные значения скорости передвижения (штриховая линия 7) и энергозатрат (8) горноспасателей, в частности, без дополнительного груза несущественно отличаются от соответствующих их значений для пожарных, то есть меньше в 1,11 и 1,24 раза.

Результаты исследований по определению энергозатрат пожарных при передвижении по лестнице, расположенной под разными углами, приведенные в табл. 6.9. при этом принято, что движение вниз осуществляется под отрицательным углом, а вверх — под положительным.

На основе данных, приведенных в табл. 6.10 получены зависимости, приведенные на рис. 6.7. Как и раньше, точками обозначены экспериментальные данные, а кривые отображают результаты аппроксимации, которые описываются следующими уравнениями:

Таблица 6.10

## Энергозатраты пожарных при подъеме по лестнице

Угол $\alpha^\circ$	Без груза		Перенос груза 30 кг		Перенос потерпевшего	
	$q_r$ , л/мин	$Q_m$ , Вт	$q_r$ , л/мин	$Q_m$ , Вт	$q_r$ , л/мин	$Q_m$ , Вт
-90	1,26±0,14	408,6	—	—	—	—
-30	0,90±0,13	291,9	1,60±0,15	520,0	1,45±0,13	470,2
0	1,10±0,15	357,0	1,62±0,14	525,3	1,44±0,15	467,0
30	1,53±0,13	496,2	1,78±0,14	577,2	1,67±0,15	541,6
45	—	—	2,05±0,16	664,3	1,83±0,16	592,4
65	—	—	2,45±0,13	794,4	—	—
90	2,35±0,15	762,1	—	—	—	—

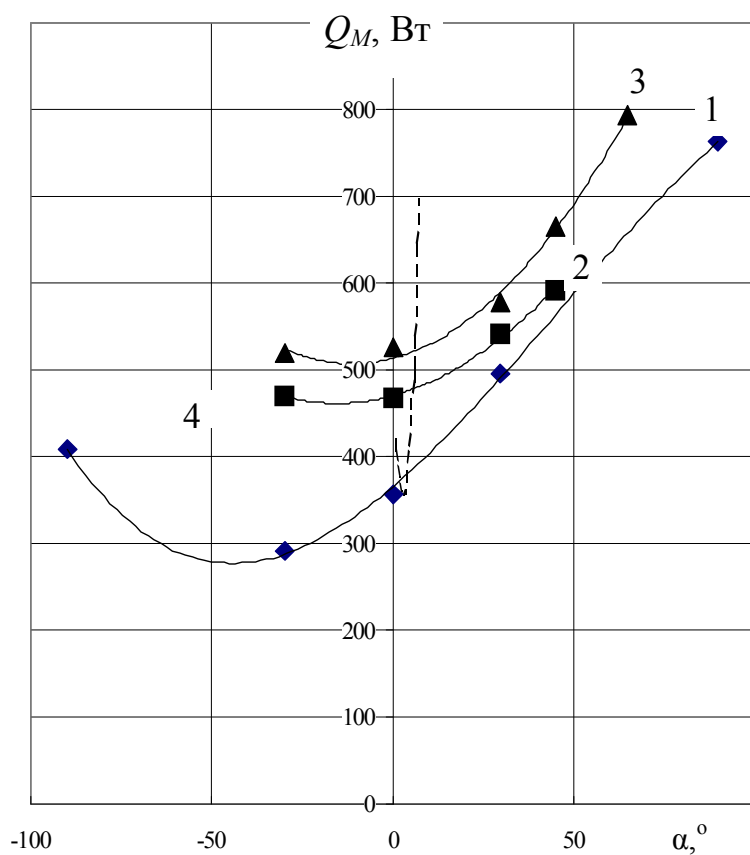


Рис. 6.7. Зависимость энергозатрат пожарных при движении от угла наклонной поверхности:

1 – без груза; 2 – при переносе потерпевшего на носилках; 3 – с грузом 30 кг, 4 – для горноспасателей без груза

$$Q_m(1) = -0,00002 \alpha^3 + 0,027 \alpha^2 + 3,585 \alpha + 364,94; \quad (6.33)$$

$$Q_m(2) = 0,0366 \alpha^2 + 1,126 \alpha + 470,15; \quad (6.34)$$

$$Q_m(3) = 0,049 \alpha^2 + 1,1035 \alpha + 513,05. \quad (6.35)$$

Отсюда следует, что энергозатраты нелинейно связаны с углом наклона лестницы, причем наибольшая нелинейность отвечает движению без дополнительного груза.

По поведению кривых также видно, что все они имеют область минимума, причем она отвечает отрицательным углам, и чем высшая нагрузка, тем более этот угол стремится к горизонтали.

Очевидно, это можно объяснить тем, что при спуске по лестнице сила, вызванная массой тела пожарного в снаряжении сначала облегчает движение, но при превышении угла наклона определенных значений приходится тратить дополнительную энергию для обеспечения равновесия.

Энергозатраты меняются в основном в диапазоне свыше 320 до 800 Вт, что относится к категории физической нагрузки как «тяжелая» и «очень тяжелая». Отношение энергозатрат горноспасателей (штриховая линия 4) к энергозатратам пожарным, в частности, при передвижении без дополнительного груза наверх, равняется 1,13, вниз – 1,45 при  $\alpha = 60^\circ$ .

Полученные уравнения (6.38-6.46) позволяют определять энергозатраты членов подразделений пожарных в зависимости от отдельных вышеуказанных параметров. При учете двух наиболее характерных для пожарных параметров: скорости передвижения и массы груза, который переносится  $m_\Gamma$ , кг, зависимость, которая аппроксимирует энергозатраты  $\Phi_m$  с максимальной относительной погрешностью 4 %, имеет вид

$$Q_m = 9,9733v_d - 0,0451v_d^2 - 19,2152m_\Gamma + 0,5188 m_\Gamma^2 + 0,1077v_d m_\Gamma + 24,0896. \quad (6.36)$$

По приведенным зависимостям составленная программа, которая позволяет определять энергетическую нагрузку на членов подразделений пожарной охраны при планировании разных маршрутов на учебных полигонах, проведении пожарно-спасательных работ, включая тушение пожаров, а также позволяет проводить исследование теплового баланса в защитной одежде, обеспечивая при этом эффективность проведения работ и безопасность пожарных.

### 6.5.3. Исследование динамики температуры под изолирующей одеждой пожарных и определение длительности в ней работы

В результате проведенных исследований в тепловой камере при температуре окружающей среды  $(100 \pm 1) ^\circ\text{C}$  защитной одежды пожарных, что состоит из термостойкого и теплоотражающего внешнего костюма с водоледающей системой охлаждения, в том числе с дополнительным охлаждением кистей рук и стоп ног, а также без системы охлаждения (один внешний костюм), получены зависимости изменения по времени температуры внешней поверхности, пододежного пространства и частоты сердечных сокращений, приведенные на рис. 6.8 и 6.9. При этом, в связи с равномерным распределением ОЭ-2 в области основной части тела пожарных, температуры пододежного пространства в этих местах практически равные, потому приведенные результаты в виде одной кривой, а для ЧСС – максимальные их значения при выполнении упражнений в тепловой камере без учета отдыха [25].

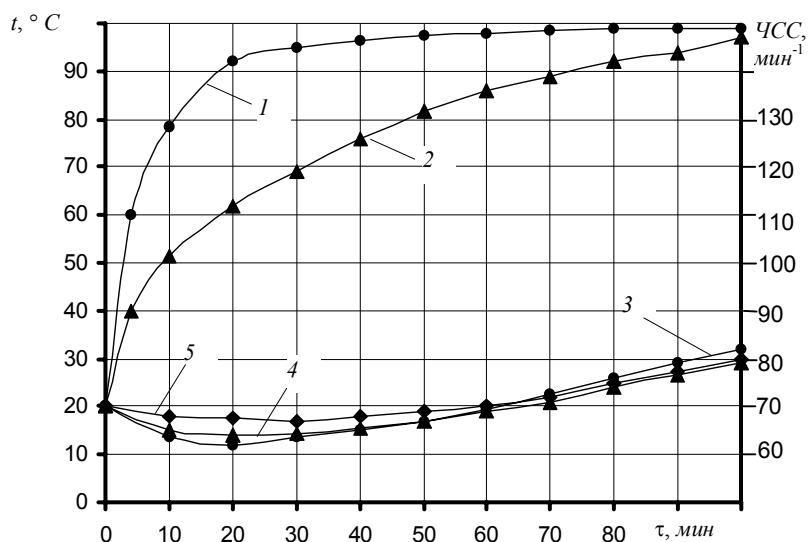


Рис. 6.8. Результаты экспериментальных исследований динамики температуры на внешней поверхности (1), в пододежном пространстве в области основной части тела (3), кистей рук (4), стоп ног (5) и ЧСС (2) в костюме с системой охлаждения

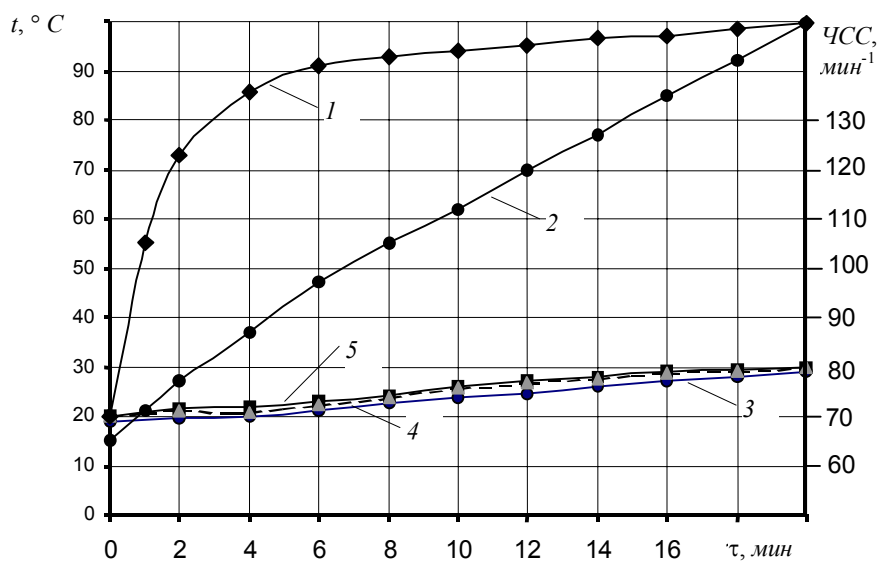


Рис. 6.9. Результаты экспериментальных исследований динамики температуры на внешней поверхности (1), в подкостюмном пространстве в области председателя (3), кистей рук (4), стоп ног (5) и ЧСС (2) в костюме без охлаждения

Полученные результаты показывают, что с учетом санитарной нормы температуры пододежного пространства около  $30^{\circ}\text{C}$  допустимая длительность работы пожарных в одежде с системой охлаждения приблизительно в 5 раз выше, чем без нее, причем этот факт подтверждается значением частоты сердечных сокращений, которая равняется около  $150 \text{ мин}^{-1}$ , а температура в области кистей рук и стоп ног с дополнительным их охлаждением льдом ниже, чем в другой части тела пожарных и, наоборот, в одежде без этого охлаждения.

Результаты экспериментальных исследований защитной одежды пожарных с аналогичной системой охлаждения при влиянии теплового лучевого потока от очага пожара приведены на рис. 6.10.

При этом получено, что среднее значение температуры горения древесины равняется  $987^{\circ}\text{C}$ , лучистый поток, действующий на испытуемого, равняется приблизительно  $5 \text{ кВт/м}^2$ , температура среды около  $450^{\circ}\text{C}$ , а температура в пододежном пространстве в области основной части тела пожарных также быстрее достигает санитарной нормы около  $30^{\circ}\text{C}$  в сравнении с температурой в области кистей рук и стоп ног.

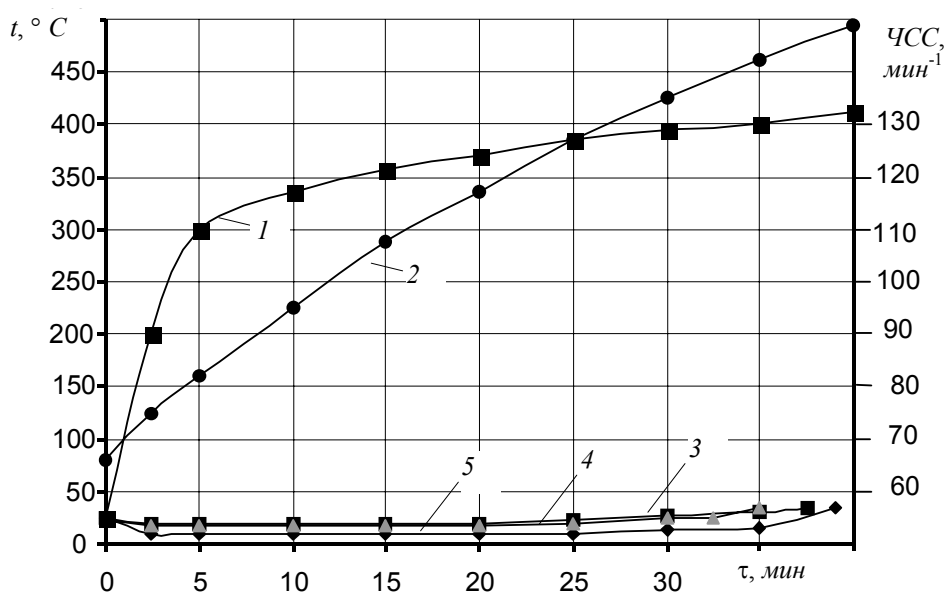


Рис. 6.10. Результаты экспериментальных исследований динамики температуры на внешней поверхности (1), в подкостюльном пространстве области основной части тела (3), кистей рук (4), стоп ног (5) и ЧСС (2) пожарных в костюме с системой охлаждения при влиянии теплового лучистого потока от очага пожара  $5 \text{ кВт/м}^2$

#### 6.5.4. Адекватность результатов расчета теплового баланса организма пожарного в неизолирующей защитной одежде

Как следует из приведенного краткого аналитического обзора по определению нормативов ПТР в исследованиях преобладают два альтернативных методических подхода: экспериментальный и теоретический. Эксперимен-

тальный метод строится на физическом моделировании микроклиматических условий в лабораторной тепловой камере или на полигоне при горении деревянных костров и исследовании влияния этих условий на организм испытуемых, физически здоровых добровольцев, в основном, профессиональных работников. Для получения статистически достоверных результатов таких исследований необходимо моделировать разные соединения большого числа исходных данных, а также для каждого соединения, учитывая индивидуальные отклонения получаемых данных у каждого человека, привлекать в каждый вариант опыта не менее трех испытуемых.

Перечень основных факторов, которые влияют на накопление теплоты в организме пожарного с указанием реального диапазона изменения их значений в практической обстановке и количестве опытов, который необходимо выполнить, чтобы выучить влияние каждого фактора независимо от значений других, приведенный в табл. 6.7.

Для решения поставленной задачи экспериментальным путем согласно табл. 3.7 необходимо было бы провести 5184 единичных опытов. Однако, даже такой большой объем работы не дал бы статистически достоверных результатов. Для учета индивидуальных расхождений испытуемых каждый опыт необходимо повторить на нескольких испытуемых при одинаковых исходных параметрах.

Таблица 6.7

Основные исходные параметры процесса теплообмена между организмом пожарного и окружающей средой

Наименование параметра	Диапазон изменения параметра	Количество вариантов опыта
Температура воздуха, °С	25 – 70	6
Относительная влажность воздуха, %	40 – 100	3
Скорость движения воздуха, м/с	0 – 15	3
Тепловой лучезарный поток, кВт/м <sup>2</sup>	1,2 – 4,1	3
Физическая нагрузка, энергозатраты, Вт	160 – 800	2
Термическое сопротивление одежды, КЛО	1,0 – 1,5	2
Теплоотвод за счет дыхания в респираторе, Вт	15 – 30	2
Исходная средняя температура тела (СТТ), °С	35 – 36	2
Разница между температурами поверхности помещения (подземных сооружений) и воздуха, °С	0 – 20	2

Для обеспечения необходимой статистической достоверности результатов экспериментов каждый опыт стоило бы повторить шесть раз, то есть проводить на шести испытуемых. В этом случае общее количество опытов равнялись бы 31104, что выполнить практически невозможно. В связи с этим, обычно исключают из исследований некоторые менее важные параметры, количество вариантов и параллельных опытов, снижая тем же статистиче-

скую достоверность результатов, и таким способом уменьшают необходимое количество опытов на один, два порядка. Однако, и в таком случае объем экспериментальных исследований является достаточно трудоемким и требует для реализации больших расходов времени и средств.

Поэтому, для решения данной задачи принят другой путь – математическое моделирование процесса теплообмена между организмом пожарного и окружающей средой с учетом всех параметров, приведенных в табл. 6.7, составлена программа с возможностью ее корректировки по экспериментальным данным. В этом случае появилась возможность существенно сократить необходимое количество единичных экспериментов при участии людей, проводя их при наиболее характерных, узловых значениях исходных параметров. Кроме этого, что особенно важно, при анализе целесообразно в полном объеме использовать результаты экспериментальных исследований, проведенных раньше в НИИГД «Респиратор» и за рубежом.

Проверка корректности и правомерности результатов расчета по уточненной математической модели проведена по результатам трех серий экспериментов, выполненных нами, и работ института горноспасательного дела ФРГ [12].

Расчет ПТР по уточненной и (для сравнения) по существующим математическим моделям проведен для следующих отдельных исходных данных при ведении пожарно-спасательных работ пожарными в неизолирующей одежде: относительная влажность воздуха – 100 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, энергозатраты человека – 320 Вт, КПД человека – 0,2, разница между температурой воздуха и поверхностью помещения (подземные сооружения) равняется 0 °С, масса и рост человека, соответственно – 70 кг и 170 см, теплоотвод за счет дыхания в респираторе с химически связанным кислородом равняется 30 Вт. Сравнительные данные этого расчета приведены в табл. 6.8.

Таблица 6.8

Результаты расчета ПТР, мин, по существующей и уточненной математическим моделям

Наименование математической модели	Температура воздуха окружающей среды, °С					
	27	30	35	40	45	50
Существующая	>240	99,3	39,6	23,2	15,5	11,2
Уточненная	152,8	68,9	33,7	21,0	14,5	10,6

Отсюда следует, что ПТР при расчете по существующей математической модели по сравнению с расчетом по уточненной модели при температуре воздуха окружающей среды 27 °С превышает более, чем в 1,6, при 30 °С – в 1,5 раза, а при 35 °С – приблизительно в 1,2 раза.

Результаты расчета ПТР по разработанной математической модели при доверительной вероятности статистической обработки данных эксперимен-



тов, равной 0,95, в сравнении с данными экспериментов, полученных в ФРГ, приведены в табл. 3.9.

Результаты исследований получены для следующих исходных данных: скорость движения воздуха – 0,4 м/с, энергозатраты – 315 Вт, КПД человека – 0,2, термическое сопротивление спецодежды – 1,0 КЛЮ, прирост СТТ (к моменту достижения в экспериментах уровня ВТТ – 38,5 °С) – 2,3 °С, респиратор отводит из организма 15 Вт теплоты.

Таблица 3.9

Сравнительные результаты безопасной длительности работы испытателей при экспериментальных исследованиях института горноспасательного дела ФРГ и расчета по уточненной математической модели

Результаты экспериментов			Результаты расчета по уточненной модели, мин
Температурно-влажный индекс WD, °С	Количество опытов (всего 223)	Средняя длительность работы, мин	
29,00	–	–	115,2
29,75	20	110	94,4
30,50	25	76	79,7
31,05	26	65	71,3
34,40	37	44	42,5
37,35	40	30	30,4
40,05	28	23	23,6
43,20	25	18	18,4
46,50	22	15	14,6
50,00	–	–	11,7

Следует отметить, что прямое сравнение данных института ФРГ и отечественных по ПТР неправомерно. В соответствии с отечественными нормативами у нас существует два критерия: допустимая (ДПР) и предельная (ППР), длительность работы каждой из которых, определяется по двум видам температуры тела, а именно ВТТ и СТТ. Исследователи института ФРГ используют в качестве ПТР один критерий, названный ими максимальной длительностью работы, обусловленной значением ВТТ, равным 38,5 °С, что находится между отечественными значениями ВТТ для ДПР (38,0 °С) и ППР (38,7 °С). При этом в работах отсутствуют данные об исходной ВТТ испытателей и динамике ее изменения в процессе опытов, однако эти данные дают возможность для сравнения с расчетными результатами уточненной математической модели.

Как известно, в подобных экспериментальных исследованиях в динамике теплонакопления организма человека уровень ВТТ всегда выше СТТ и разница между ними составляет 0,5-0,8 °С. Исходя из логического предположения, что динамика изменения ВТТ и СТТ в экспериментах одинаковая, на-

ми определен эквивалентный прирост СТТ, который вызывает увеличение ВТТ до  $38,5^{\circ}\text{C}$ . Путем линейной интерполяции данных табл. 3.9 для температуры воздуха  $30$  и  $40^{\circ}\text{C}$ , полученный прирост СТТ равняется  $2,3^{\circ}\text{C}$ . Используя этот критерий, проведен расчет по уточненной математической модели прогнозируемой максимальной (по принятой во ФРГ терминологии) длительности работы при восьми значениях этого индекса от 29 до 50.

Сравнение результатов (табл. 3.9) показывает, что получено удовлетворительное совпадение, потому что максимальная погрешность при  $WD = 29,75^{\circ}\text{C}$  равняется около 14 %. Анализируя результаты, следует отметить, что в области температуры воздуха  $30^{\circ}\text{C}$  и ниже ПТР изменяется очень быстро при повышении температуры на десятые доли градуса. Согласно данным института ФРГ при увеличении индекса  $WD$  на  $0,75^{\circ}\text{C}$  (от  $29,75$  до  $30,5^{\circ}\text{C}$ ) длительность работы уменьшилась на 34 мин, а по результатам расчета уточненной модели – на 14,7 мин. Очевидно, значение 110 мин здесь является необоснованным, потому что в рабочих таблицах для использования на практике авторы ранее приняли для температуры  $30^{\circ}\text{C}$  длительность работы 95 мин.

Сравнение данных экспериментальных исследований института ФРГ и результатов расчета по уточненной математической модели (см. табл. 3.9) подтверждает корректность разработанной математической модели.

И, наконец, была выполнена контрольная серия экспериментов из шести опытов при участии трех профессиональных пожарных.

Методика исследований была, в основном, аналогичная вышеприведенной. Фактическая энергетическая нагрузка уточнялась дополнительно путем анализа химпоглощения респиратора до опыта и после него, со следующим расчетом количества поглощенного диоксида углерода и соответствующих энергозатрат. Они оказались равными (380...420) Вт. Действительные энергозатраты были рассчитаны для каждого из трех испытуемых в соответствии с массой их тела путем линейной интерполяции, исходя из базового уровня: при массе тела 70 кг, энергозатраты равны 356 Вт.

Как следует из результатов этого контрольного исследования, невзирая на малое количество опытов, при максимальной погрешности 12,4 %, они подтверждают возможность применения уточненной математической модели теплового баланса пожарного в неизолирующей одежде и разработки на ее базе расчетной программы.

Сравнительные результаты расчета ДПР по существующей и уточненной математических моделях теплового баланса горноспасателей, а также данные ДПР пожарных в неизолирующей одежде при относительной влажности воздуха 100 % и средней нагрузке в зависимости от температуры окружающей среды, приведенные на рис. 6.11.

Отсюда выходит, что значение ПТР, полученные по уточненной математической модели, в сравнении с результатами расчета по существующей математической модели для температур  $27$ ,  $30$  и  $35^{\circ}\text{C}$ , меньше приблизительно в 1,6, в 1,5 и 1,2 раза, соответственно. В то же время нормативные данные ПТР для пожарных в сравнении с результатами расчета по уточнен-

ной математической модели для температур 31 и 35 °С больше в 1,5 и 1,2 раза, соответственно, что может привести к тепловым поражениям их организма. В крайнем случае, на оснастке подразделений пожарной охраны должны находиться средства для экстренного охлаждения пожарных при перегревании.

На основании полученных вышеприведенных результатов исследований разработано алгоритм и составленная программа расчета безопасной длительности работы пожарных в неизолирующей защитной одежде, приведенные в следующем разделе.

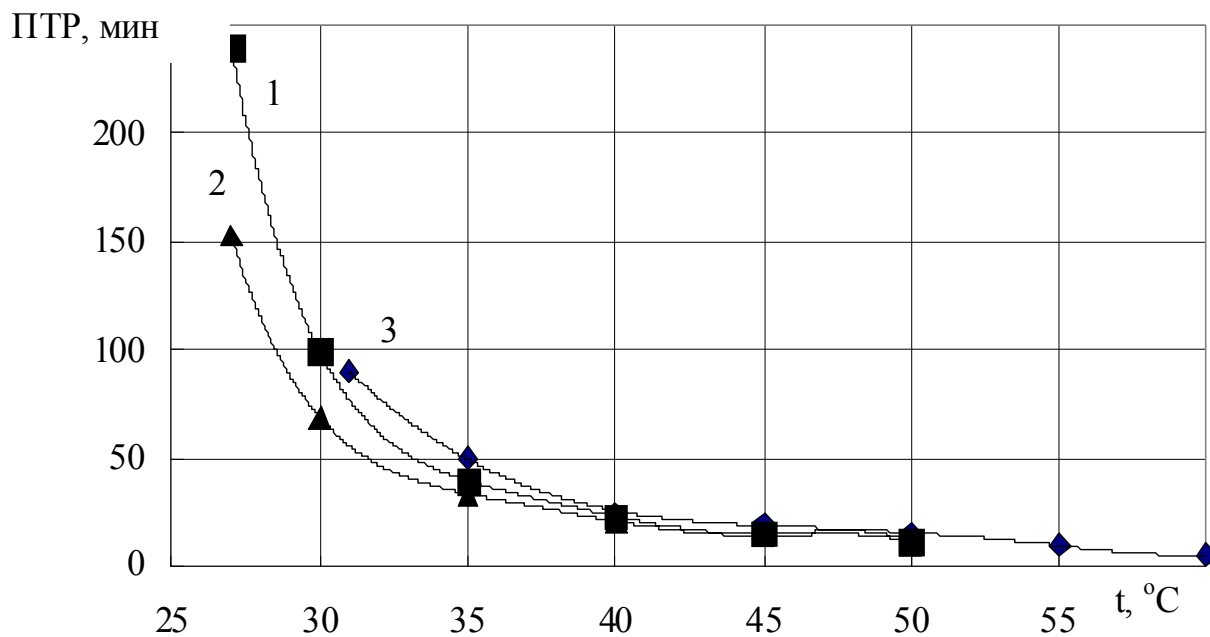


Рис. 6.11. Сравнительные результаты расчета допустимой длительности работы горноспасателей (1, 2) и пожарных (3) в зависимости от температуры окружающей среды при относительной влажности 100 % и средней нагрузке:

- 1 – по существующей математической модели;
- 2 – по уточненной математической модели;
- 3 – по данным экспериментов для пожарных.

На основании результатов вышеприведенных исследований разработаны алгоритмы и составлены программы «Термоэкстрем-1» и «Термоэкстрем-2» для расчета безопасной длительности работы пожарных в изолирующей одежде с системой охлаждения и без нее, соответственно, а также обоснованы конструкции и технические характеристики противотепловых костюмов для пожарных подразделений.

## **7. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОТИВОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ГОРНОСПАСАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЖАТОГО ВОЗДУХА**

### **7.1 Существующие методы и технические средства обеспечения работы горноспасателей в противогазотепловой одежде**

Как отмечено выше, для экстренного замораживания, хранения и доставки в горные выработки шахт охлаждающих элементов к месту ведения горноспасателями аварийно-спасательных работ в 80-х годах прошлого столетия разработан мобильный комплекс противотепловых средств (МКПС) «Зима-А». Из десяти изготовленных в 1983 г. комплексов на оснащении подразделений ГВГСС в Украине осталось три, остальные – в странах СНГ. При этом замораживание ОЭ-2 производилось азотом, который в жидком состоянии может транспортироваться в емкостях массой от 1 до 25 тонн под давлением до 0,2 МПа. Одна тонна жидкого азота дает около 860 м<sup>3</sup> газообразной среды с температурой кипения до минус 197 °С. Газ не токсичен и может быть использован в установке, работающей по открытому циклу.

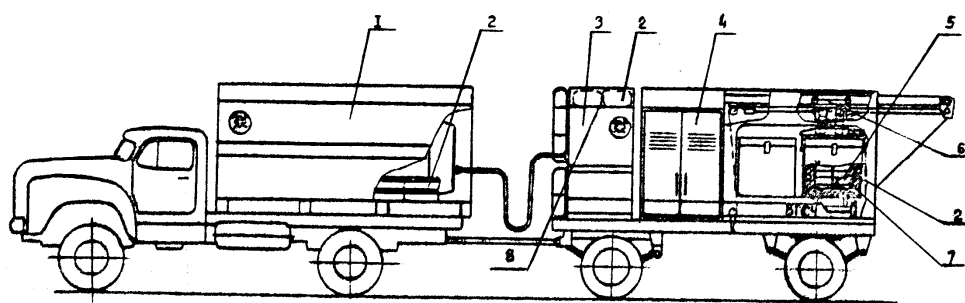
Замораживание ОЭ-2 с помощью азота имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами, однако эффективность применения МКПС «Зима-А» зависит от своевременного обеспечения их жидким азотом. В связи с этим, принимались попытки использования других способов и средств для экстренного замораживания ОЭ-2, в частности, сжатого воздуха, получаемого от компрессорной станции аварийной шахты. Однако эти попытки закончились неудачно [23].

Установка «Зима-А», входящая в состав МКПС (рис. 7.1), предназначена для хранения защитной одежды (противотепловых курток, костюмов) в состоянии готовности к немедленному выезду, замораживания ОЭ-2 при движении на аварийную шахту и на ее поверхности, хранения ОЭ-2 в замороженном состоянии и доставки их вагонетками-термосами или теплоизолирующими контейнерами в горные выработки к месту выполнения горноспасательных работ.

Процесс замораживания ОЭ-2 показан на рис. 7.2.

Жидкий азот по криогенному шлангу под давлением 0,2 МПа при температуре до минус 184 °С подается от автоцистерны АГУ-2М на головку соединения 1. В испарителе-теплообменнике 2 азот испаряется и его температура повышается от минус 163 до минус 93 °С. Затем он поступает в сопла эжекторов 4 и в газообразном виде проходит в верхнюю часть холодильной камеры 5, а через нижнюю – выходит в испаритель-теплообменник 2. В холодильной камере 5 азот проходит этажерку поддонов с ОЭ-2, установленных в 11 этажей, которые отдают ему свое тепло. Избыток азота удаляется через канал выхлопной 6, в котором установлен контрольный термометр 7. После окончания замораживания ОЭ-2 вместе с поддонами извлекают из холодильной камеры и укладывают в контейнеры, а на их место на поддоны укладывают новую партию

ОЭ-2. Конструкция холодильной камеры позволяет одновременно охлаждать 462 ОЭ-2.



*Вид А*

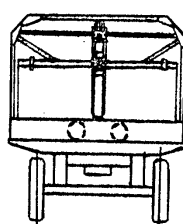


Рис. 7.1. Мобильный комплекс противотепловых средств (МКПС) «Зима-А»:

- 1 – автомобиль ЗИЛ-130 с АГУ-2М; 2 – контейнеры; 3 – холодильник;  
4 – шкаф; 5 – вагонетка-термос; 6 – устройство грузоподъемное;  
7 – охлаждающие элементы; 8 – комплект ЗИП; 9 – прицеп

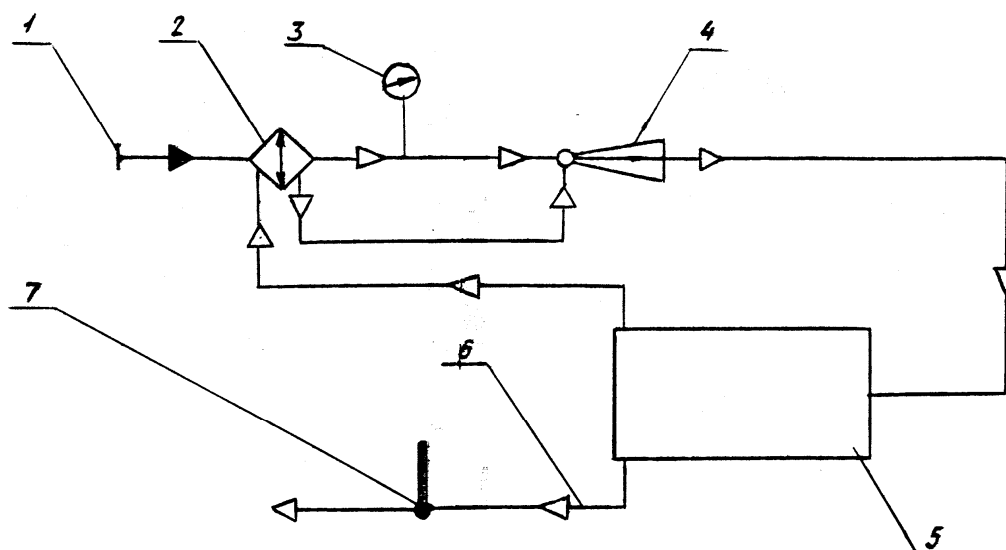


Рис. 7.2. Схема замораживания охлаждающих элементов:

- 1 – головка соединения; 2 – испаритель-теплообменник;  
3 – манометр; 4 – эжектор; 5 – холодильная камера;  
6 – выхлопной клапан; 7 – контрольный термометр.

Техническая характеристика холодильника приведена в табл. 7.1, а его устройство – на рис. 7.3.

Техническая характеристика холодильника

Наименование параметра	Значение параметра
Количество ОЭ-2 в холодильной камере, ед, не менее	462
Время первого замораживания, мин, не более в правой части камеры в левой части камеры	85 145
Время второго и последующего замораживания, мин, не более в правой части камеры в левой части камеры	65 120
Минимальная температура ОЭ-2, °С	минус 65
Расход жидкого азота на одну партию ОЭ-2, кг, не более	350
Время для запуска морозильной установки, мин, не более	15
Время разгрузки-загрузки камеры при трех обслуживающих, мин, не более	15
Габаритные размеры, мм, не более	230×1200×1960
Масса, кг, не более	1500
Срок службы, лет, не менее	10

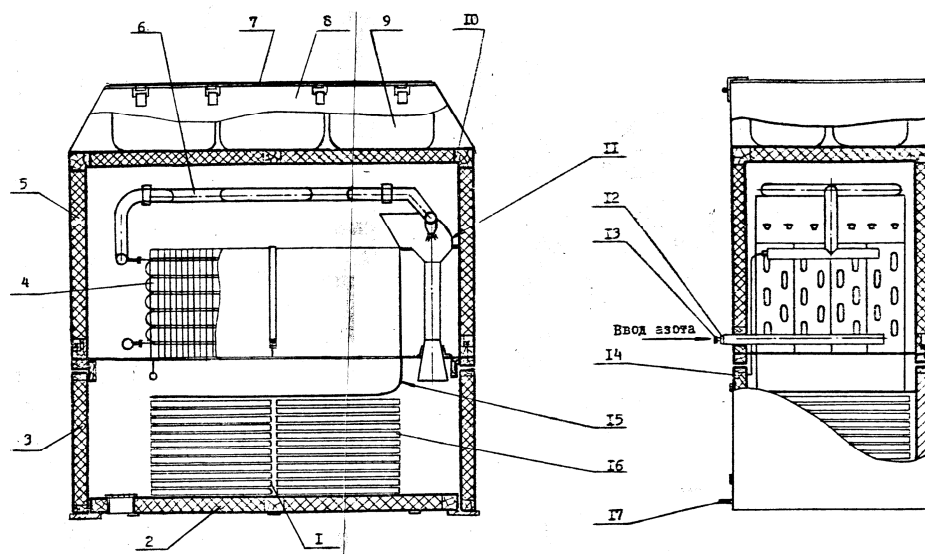


Рис. 7.3 – Холодильник: 1 – рама; 2 – корпус; 3 – крышка;  
4 – блок испарителей; 6 – трубопровод; 7 – крышка; 8 – ящик;  
9 – контейнер (6 шт.); 10 – изоляция; 11 – эжектор; 12 – штуцер;  
13 – элемент присоединения; 14 – манометр; 15 – трубопровод;  
16 – поддон; 17 – термометр.

Следует отметить существенную неравномерность замораживания ОЭ-2 в холодильной камере.

Для хранения и доставки в горные выработки шахты большого количества замороженных ОЭ-2 используют вагонетку-термос, обоснование параметров которой приведено в следующем разделе.

Для доставки небольшого количества замороженных ОЭ-2 непосредственно к месту ведения горноспасательных работ используют теплоизолирующий контейнер К-2, который снабжен ремнями для его переноса руками или на плече, а его конструкция и техническая характеристика также приведены в следующем разделе.

Масса установки «Зима-А» 7675 кг, длина – 13,3 м.

Несвоевременность доставки, невозможность длительного хранения, высокая стоимость жидкого азота и МКПС «Зима-А», с помощью которого замораживание ОЭ-2 одноразового применения осуществляется только на поверхности шахты, являются причиной разработки альтернативного метода и технических средств для экстренного их замораживания, как на поверхности, так и в горных выработках шахт.

Рассмотрим существующие способы, технические средства экстренного получения холода и определим возможность их использования для замораживания ОЭ-2.

## 7.2 Методы получения холода и схемы холодильных установок

В машиностроении холод используют в установках для обработки и испытания деталей, узлов и механизмов, работающих в режимах резко неравномерного его потребления [23].

Основные принципы работы холодильных машин и методы получения холода базируются на следующих физических явлениях: изоэнтальпное (либо близкое к этому процессу) расширение газа с совершением внешней работы; дросселирование реального газа (эффект Джоуля-Томпсона); эффект Ранка при расширении газов (вихревой эффект); испарение жидкостей при низких температурах; десорбция газов из их растворов в жидкостях; десорбция газов, поглощенных твердыми телами; термоэлектрический эффект Пельтье; магнитно-калорический эффект размагничивания твердого тела.

Перечисленные физические эффекты используют в холодильных машинах непрерывного и периодического действия, работающих по замкнутому или разомкнутому циклам.

В качестве хладагентов в холодильных циклах используют газы, жидкости, свободные электроны в системах (электронный газ) и связанные электроны парамагнитных веществ.

Изоэнтальпное расширение газа, иногда называемое адиабатным – это процесс обратимого расширения газа с выполнением внешней работы при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Практически этот процесс осуществляется в расширительных машинах поршневого, турбинного или роторного типов. При изоэнтальпном расширении идеального газа с начальной температурой  $T_1$  от давления  $P_1$  до давления  $P$  при совершении внешней работы температура газа снижается на величину.

$$\Delta T_s = T_1 [1 - (P / P_1)^{(k_3 - 1) / k_3}],$$

где  $k_3$  – показатель адиабаты газа.

Дросселирование – процесс перехода газа или жидкости от состояния с высоким давлением к более низкому без совершения внешней работы и без теплообмена с окружающей средой, когда поток жидкости или газа внезапно сужается вследствие уменьшения сечения диафрагмой, вентилем или пористой средой, а затем опять получает возможность двигаться в большем сечении.

Вызванное изменением внутренней энергии падение температуры определяется соотношением

$$\Delta T_i = \int_{P_1}^P d_i dP,$$

где  $d_i$  – дифференциальный дроссельный эффект, который в некотором интервале давлений может быть постоянным и равным  $d_{i\text{cp}}$ .

Тогда

$$\Delta T_i = d_{i\text{cp}} \Delta P.$$

Для воздуха  $d_{i\text{cp}} \approx 2,5$  К/МПа

Эффект Ранка. Если газ с температурой  $T_1$  и давлением  $P_1$  выпустить тангенциально в цилиндрическую трубу через сопло, в котором газ расширяется до давления  $P_2$  и разгоняется до скорости  $w$ , то поток, вращаясь, разделится на два слоя с температурами  $T_x$  (холодный газ) и  $T_r$  (горячий газ), причем

$$T_x < T_1 < T_r.$$

Эффективность охлаждения  $h_x$  за счет вихревого эффекта оценивается отношением разности между конечной и начальной температурами потока в трубке Ранка-Хилша и изоэнтропной разности температур потока при том же перепаде давлений

$$h_x = \Delta T_x / \Delta T_s = (T_1 - T_x) / T_1 [1 - (P_x / P_1)^{k_3 - 1 / k_3}].$$

Испарение жидкости. Температуры кипения и конденсации жидкости являются функцией давления, причем, чем ниже давление, тем ниже температура кипения. В качестве хладагентов часто используют вещества, которые при высоком давлении и температуре окружающей среды могут быть превращены в жидкость. Испарение жидкости при низком давлении происходит при температуре ниже температуры окружающей среды.

К наиболее распространенным хладагентам относятся аммиак, диоксид углерода, пропан, фреоны.



Температуры кипения (испарения) веществ, используемых в качестве хладагентов, при атмосферном давлении, приведены в табл.7.2.

Таблица 7.2

## Температуры кипения (испарения) веществ

Наименование веществ	Температура кипения (испарения), К
Аммиак	239,9
Диоксид углерода	194,7
Сернистый ангидрид	263,1
Хлористый метил	249,5
Фреоны	238,0-243,8
Этилен	168,0
Метан	111,7
Кислород	90,2
Азот	77,4

Десорбция газов и растворов. Многие газы хорошо растворяются в жидкостях, например аммиак в воде, диоксид углерода в спирте, газообразные углеводороды в жидких веществах и т.д. Растворимость газов в жидкостях возрастает пропорционально с увеличением давления. Выделение газа из жидкости, как и испарение, сопровождается резким увеличением объема и отводом тепла растворения. Разработаны методы получения холода, основанные на десорбции газов из растворов. Этот процесс использован, например, в циклах водноаммиачных абсорбционных холодильных машин и в разомкнутых холодильных системах с использованием растворов диоксида углерода в этиловом спирте. Количественные значения теплоты растворения (и соответственно теплоты десорбции) и конденсации при различных давлениях для различных систем приведены в работе.

Десорбция газов, поглощенных твердыми телами. Пористые твердые тела с развитой поверхностью, называемые адсорбентами, поглощают газы. Такое поглощение иногда сопровождается образованием нестойких химических соединений (комплексов). Адсорбция газов твердыми телами увеличивается с ростом давления. При снижении давления происходит десорбция газа, сопровождающаяся отводом тепла. Этот процесс может быть использован для получения холода. На практике используют процесс поглощения аммиака хлористым кальцием и силикагелем. Значения теплоты десорбции могут превышать значения теплоты испарения в 1,2-2,5 раза.

Термоэлектрический эффект основан на следующем физическом явлении: если через цепь, состоящую из спаев двух разных проводников, пропускать электрический ток, то один спай охлаждается, а второй нагревается. Разность температур горячего  $T_r$  и холодного  $T_x$  спаев пропорциональна в некотором интервале напряжений приложенному напряжению  $E_1$ .

$$E_1 = \alpha_1(T_{\text{г}} - T_{\text{х}}),$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент, определяющий величину термоэлектродвижущей силы при разности температур горячего и холодного спаев в 1 К.

Магнитно-калорический эффект, основанный на взаимодействии магнитного поля и молекул парамагнитных веществ, используют только при необходимости получения температур, близких к абсолютному нулю.

Различают замкнутые и разомкнутые циклы холодильных установок.

В замкнутых циклах один и тот же хладагент непрерывно циркулирует в системе. В разомкнутую систему охлаждения рабочее вещество подается извне и непрерывно или периодически расходуется на месте потребления.

В химической и пищевой промышленности применяют главным образом замкнутые холодильные циклы, в машиностроении – оба цикла, но преимущественно используют разомкнутые. Это объясняется спецификой технологии: большим числом разбросанных объектов, периодичностью процессов охлаждения, неравномерностью использования холода, значительной потребностью в относительно небольших единичных расходах холода при очень низких температурах, получение которого эффективно только на установках большой производительности.

В машиностроении применяют охлаждение в широком диапазоне температур (до 80 К). Очень широк также диапазон производительностей: от тысяч киловатт для установок испытания комплектных авиационных, космических и транспортных объектов до сотен ватт, например, для установок обработки холодом мелких деталей с целью их упрочнения. Все установки характеризуются очень высокой степенью неравномерности потребления холода во времени. Это существенно влияет на выбор оптимальных циклов и схем холодильных установок.

Учитывая взрывоопасность, экологическую вредность многих газов (см. табл. 7.2), сложность конструкции парокомпрессионных машин по сравнению с машинами других типов, рассмотрим возможность использования наиболее приемлемого в нашем случае способа получения холода и альтернативных азоту хладоносителей: диоксида углерода и воздуха в установках, работающих по открытому циклу.

Системы охлаждения с испарением привозного хладагента являются разновидностью обычного разомкнутого парокомпрессорного или другого холодильного цикла, в котором испаритель находится на месте потребления холода, а хладагент доставляют каким-либо путем.

В качестве привозных хладагентов чаще всего используют, кроме жидкого азота, диоксид углерода, который можно доставлять в жидком виде и сохранять в баллонах под высоким давлением при температуре окружающей среды. Иногда его доставляют в твердом виде (сухой лед) и хранят при атмосферном давлении в емкостях, снабженных теплоизоляцией.

Жидкие привозные хладагенты используют в охлаждаемых объектах, где они испаряются при небольшом избыточном давлении собственных паров.

Диоксид углерода, в отличие от других хладагентов, может находиться в виде низкокипящей жидкости только при давлении, превышающем 0,53 МПа, а при давлении выше этой величины твердая его фаза переходит в газовую фазу при температуре окружающей среды 31 °С, минуя жидкую. Это затрудняет, но не исключают его применение для получения низких температур в летний период времени.

Использование воздушных холодильных циклов обосновано следующими причинами:

- воздух как хладагент нетоксичен, доступен и относительно дешевый. Он может быть подан из сети под давлением или непосредственно взят из атмосферы и сжат индивидуальным компрессором, использован в качестве хладоносителя в широком диапазоне температур (до 80 К);
- использование воздуха позволяет создавать холодильные установки в очень широком диапазоне производительностей (от сотен ватт до тысяч киловатт), применять стандартное компрессорное и теплообменное оборудование, капиталовложение в которое меньше, чем в специальное;
- холодильное оборудование воздушно-морозильных установок занимает относительно небольшие площади;
- воздушно-холодильные установки (ВХУ) всех типов имеют высокую мобильность, малое время разгона и вывода на режим, а также широкий диапазон регулирования.

В практике машиностроения нашли применение следующие циклы ВХУ: высокого давления, с трубкой Ранка-Хилша, с расширительными машинами.

Низкая холодопроизводительность цикла, получение низких температур только при высоких давлениях исключают возможность применения первого цикла ВХУ.

Цикл ВХУ с трубкой Ранка-Хилша состоит из компрессора, конечного холодильника, отделителя жидкости, осушительного устройства, рекуперативного теплообменника, вихревой трубы и холодильной камеры, при этом сжатый воздух охлаждается водой.

Разработаны ВХУ с расширительными машинами, работающие, в основном по разомкнутому циклу, так как они дают возможность при использовании холода осуществлять непосредственный контакт между охлаждаемым объектом и воздухом, являющимся одновременно хладагентом и хладоносителем.

Турбохолодильная установка (ТХМ-80) состоит из регенераторов с автоматически управляемыми клапанами, турбокомпрессора, турбодетандера, электродвигателя и холодильной камеры, причем турбокомпрессор и турбодетандер находятся на одном валу, а снижение температуры сжатого воздуха осуществляется водой.

Такая схема установки не может быть использована в экстремальных условиях в виду сложности конструкции, большой массы, стоимости, недостаточной надежности: выход из строя вала электродвигателя, турбокомпрессора, турбодетандера, а также невозможности использования в горных выработках шахт.

По этой причине не может быть использована воздушно-холодильная установка с жидкостным регенератором.

Выбор воздушно-холодильных установок определяется технико-экономическим анализом, в котором необходимо учитывать, кроме энергетических показателей, также указанные выше технологические преимущества воздушных машин, габариты, надежность работы и другие эксплуатационные показатели.

В качестве расширительных машин в ВХУ можно использовать серийно выпускаемые авиационные детандер-нагнетательные агрегаты систем охлаждения и кондиционирования воздуха, например 1277 ТД (турбодетандер – турбохолодильник) или 3263, 3263 Т (турбохолодильники), ресурс которых на ВХУ равен 10-15 тыс. часов.

Турбодетандер (турбохолодильник) состоит из двух основных частей: диска турбины и вентилятора, связанных между собой общим валом, который установлен на двух радиальных подшипниках. Корпус подшипников является сварной конструкцией с рядом отверстий для фитилей системы смазки подшипников и слива отработанного масла. Следовательно, турбодетандер представляет собой малогабаритную турбинную установку (длиной около 0,2 м, диаметром 0,15 м, массой не более 3,5 кг), которую можно крепить за кронштейны в любом месте и в случае выхода из строя быстро его заменить.

Турбохолодильник работает следующим образом. Воздух из сети через боковой патрубок поступает в сопловую коробку турбины и при расширении в соплах его потенциальная энергия преобразуется в кинетическую. Из сопел воздух поступает на лопатки рабочего диска турбины, на которых его кинетическая энергия превращается в механическую. Мощность, развиваемая ротором турбины, поглощается нагнетателем. Совершив работу на лопатках диска турбины, воздух направляется через осевой патрубок сопловой коробки в холодильную камеру, из которой он засасывается рабочим колесом нагнетателя через осевой патрубок в кожухе и выбрасывается в атмосферу через имеющиеся в кожухе радиальные щели и улитку.

Угловая скорость вращения ротора турбодетандера достигает 10 рад/с при давлении сжатого воздуха в сети (0,5... 0,6) МПа.

Глушитель шума при выходе отработанного воздуха из нагнетателя в атмосферу, практически не снижая мощности агрегата, уменьшает шум на (90...95) %. Глушитель прост по конструкции и надежен в эксплуатации, так как при прохождении воздуха через металлическую сетку в слой стекловаты или шлаковаты звуковые волны гасятся и выход воздуха через выхлопной патрубок сопровождается лишь незначительным шумом, характерным для скоростной струи.

Компоновочный узел ВХУ состоит из радиаторов, турбодетандера и глушителя шума, который смонтирован вместе с холодильной камерой. Холодильные камеры, как правило, представляют собой сварной стальной корпус с входным и выходными патрубками и дверью, между стенками которого помещен слой теплоизоляции из пенопласта или стекловаты.

Вихревые холодильные камеры или установки, как правило, выполнены в виде теплоизолированного шкафа, состоят из патрубка, сетчатого

фильтра, теплообменника, вихревой трубы, холодильной камеры из нержавеющей стали, эжектора, глушителя шума. Все эти агрегаты размещены в стальном каркасе и теплоизолированы шлаковатой. Сверху холодильная камера закрыта крышкой, шкаф и крышка имеют пробковую изоляцию.

Камера (установка) работает следующим образом. Сжатый воздух из сети через патрубок и сетчатый фильтр поступает в теплообменник. Пройдя между перегородками теплообменника и охладившись, сжатый воздух входит в вихревую трубу (трубы), где разделяется на два потока – холодный и горячий. Холодный поток поступает через перфорированное дно в холодильную камеру, охлаждает в ней изделия (продукты), омывает стенки холодильной камеры, а затем через трубки теплообменника направляется к смесительной камере эжектора и подсасывает холодный воздух, выходящий из теплообменника. Смешанный поток воздуха выбрасывается в атмосферу через диффузор эжектора и глушитель шума.

Диаметр холодильной камеры (ВХК-2) 0,33 м, высота 0,255 м. Расход воздуха при давлении в сети 0,6 МПа и температуре 300 К равен 125 кг/ч.

Известны различные конструктивные решения вихревых труб и области их применения, в частности: патенты для охлаждения летательных аппаратов, сепарации и осушки, определения влажности и температуры воздуха, в том числе кондиционирования кабины космического корабля, каскадные схемы кондиционирования, а также расчеты их параметров.

В литературных источниках, как правило, приведены тепловые и газодинамические расчеты составных элементов (компрессор, теплообменник, турбохолодильник или вихревая труба, камера) газовых холодильных машин, работающих по разомкнутому циклу без учета температуры окружающего воздуха и нестационарных процессов в холодильной камере тем более фазового перехода воды в полиэтиленовых ампулах, так как у них нет необходимости экстренного получения холода в камерах, причем исследования проведены при сравнительно низких температурах входящего сжатого воздуха, а поэтому не могут быть использованы в нашем случае. Однако в дальнейшем будут использованы литературные источники по расчетам и конструкторскому исполнению турбохолодильников и теплообменников, в частности.

На основании проведенного анализа методов и технических средств получения холода следует, что наиболее целесообразным способом для замораживания охлаждающих элементов, применяемых в противотепловой одежде горноспасателей является использование в качестве хладоносителя диоксида углерода и сжатого воздуха в установках, работающих по разомкнутому циклу, в качестве источника получения холода во втором случае применить турбохолодильники и вихревые трубы.

### 7. 3. Обоснование выбора хладоносителя и разработка технологических схем средств для замораживания водяных охлаждающих элементов

Из приведенного анализа следует, что с помощью существующих технических средств нельзя обеспечить охлаждающими элементами ОЭ-2 гор-

носпасателей в экстремальных микроклиматических условиях при ликвидации сложных аварий, а, следовательно, эффективную и безопасную их работу. В связи с этим, определим возможность использования альтернативных жидкому азоту хладоносителей: диоксида углерода, сжатого воздуха и разработки новых технических средств для экстренного замораживания ОЭ-2 на поверхности и в горных выработках шахт.

В качестве источников хладоносителей (рис. 7.4) могут быть использованы емкости (баллоны, цистерны) с диоксидом углерода, шахтная наземная или подземная пневмосеть и передвижные воздушные компрессоры. При этом исходными варьируемыми параметрами источников хладоносителей являются температура, расход, давление и влагосодержание, от которых будут зависеть геометрические параметры и эксплуатационные характеристики технических средств.

Подключенные к источникам хладоносителей технические средства будут состоять из следующих основных элементов: пневмотрубопроводов, турбохолодильников или вихревых труб с глушителями шума, теплообменников, холодильной камеры, трубопроводной арматуры, водофильтрующего устройства, регулирующих, фильтрующих и измерительных устройств, а исследуемые их параметры – расход, давление и температура воздуха с учетом влияния на них температуры окружающей среды. Те или иные составные элементы и их количество будут являться основой для наземной морозильной установки с использованием турбохолодильников, шахтных передвижной с турбохолодильниками и переносной с вихревыми трубами установок.

Применяемые в противогазотепловой одежде горноспасателей охлаждающие элементы ОЭ-2, которые будут находиться в холодильных камерах установок, являются третьим элементом системы, так как их параметры – масса или количество, начальная, конечная температуры и время замораживания зависят как от параметров источников хладоносителей, так и от параметров установок.

При разработке нового способа и технических средств обеспечения эффективной и безопасной работы горноспасателей в противотепловой одежде Центральный штаб ГВГСС изложил следующие основные требования:

- хладоноситель должен быть доступным в любое время, безвредным для здоровья людей, дешевле жидкого азота;
- процесс замораживания водяных охлаждающих элементов ОЭ-2 должен осуществляться на поверхности и в горных выработках аварийной шахты;
- при замораживании ОЭ-2 в горных выработках шахты предусмотреть два варианта технических средств: передвижную по рельсовому пути шириной колеи 600, 900 мм установку и переносную – массой не более 40 кг;
- обеспечить максимально возможную производительность технических средств с минимальной стоимостью и надежную их работу;
- технические средства должны располагаться на прицепе для оперативной доставки на аварийную шахту, аналогично установке «Зима-А».

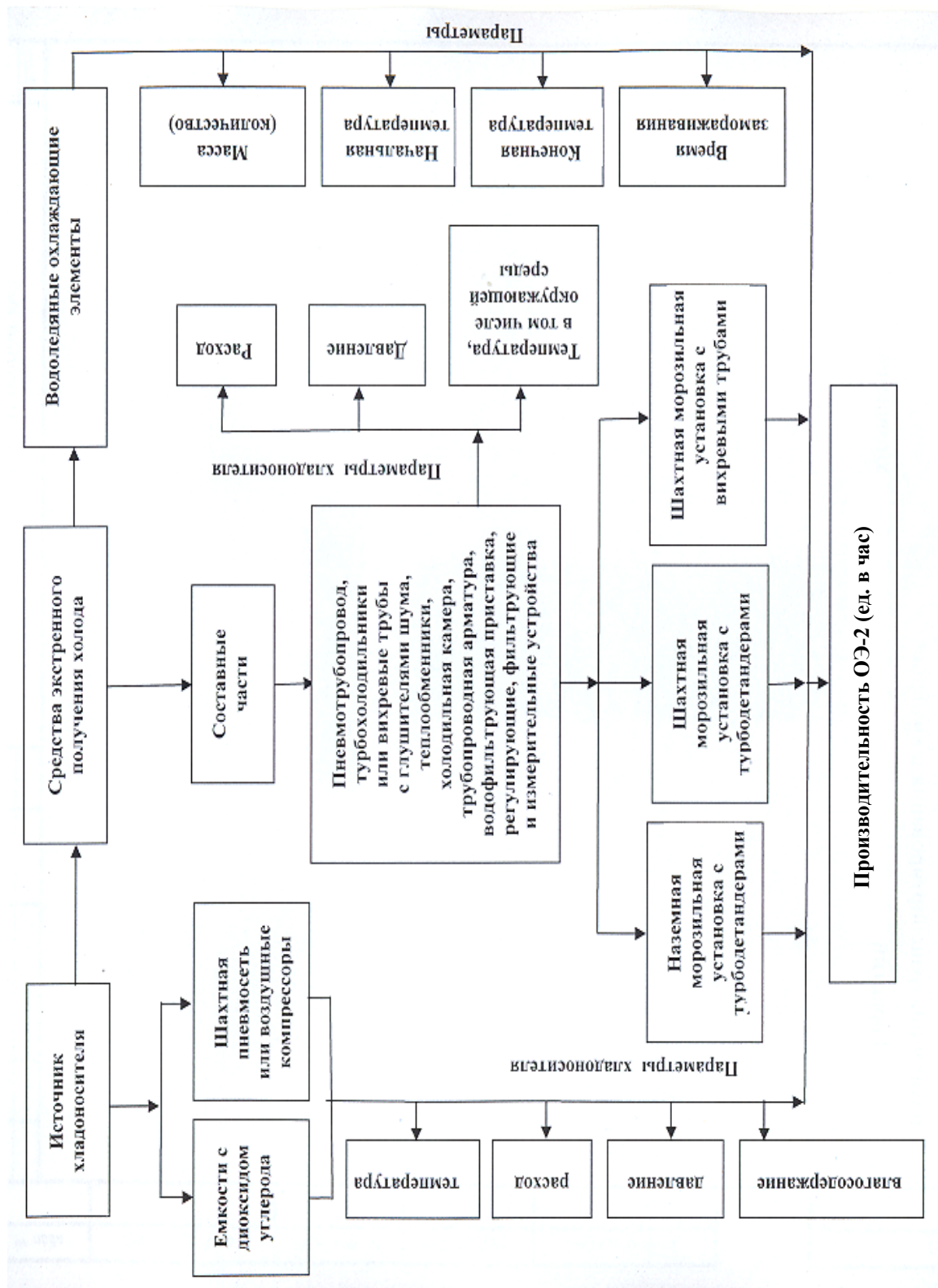


Рис. 7.4 – Структурная схема системы «источник хладонотителя – средства получения холода – водолеянные ОЭ-2»

На основании анализа методов получения холода и схем холодильных установок следует, что в данном случае в качестве хладонотителя можно использовать диоксид углерода или сжатый воздух в установках, работающих по разомкнутому циклу. Рассмотрим возможность использования этих хладонотителей с учетом вышеприведенных требований.

Диоксид углерода – это хладоноситель (хладагент) высокого давления (при 30 °С давление 7,3 МПа), имеет наибольшую объемную холодопроизводительность (в 3,5 раза больше, чем у аммиака и в 3,8 раза – чем у фреона 22. Он нейтрален к металлам и почти безвреден, тройная точка которого имеет температуру минус 56,6 °С и давление 0,536 МПа. Агрегатное состояние диоксида углерода в зависимости от температуры окружающей среды и давления меняется в широких пределах (табл. 7.3).

Таблица 7.3

## Агрегатное состояние диоксида углерода

Температура, °С	Давление газа в баллоне, МПа	Агрегатное состояние
Свыше 31,0	выше 7,5	газ
31,0 (критическая точка)	7,5	
30,0	7,3	жидкость – газ
20,0	5,8	
10,0	4,6	
0	3,5	
-20,0	2,0	
-50,0	0,7	
-56,6 (тройная точка)	0,536	твердое тело-жидкость-газ
-60	0,4	
-70	0,2	твердое тело

Как следует из таблицы, при температуре от минус 50 °С до плюс 30 °С диоксид углерода может находиться в двух агрегатных состояниях, поэтому при использовании его в баллонах или в цистерне в качестве хладоносителя необходимо охлаждать дополнительными устройствами до температуры, при которой в емкостях будет находиться максимальное количество жидкого диоксида углерода, так как в таком состоянии он, газифицируясь при выходе, обладает максимальным эффектом.

Предварительные экспериментальные исследования процесса замораживания ОЭ-2 в холодильной камере установки «Зима-А» при температуре окружающей среды 20 °С показали, что через 5-10 мин после выпуска жидкого диоксида углерода, в трубопроводной части коллектора образовывалась ледяная пробка в местах выхода его из баллонов, ввиду наличия у них воды, которая накапливается (до 3 кг) при заправках. Причем в 40-литровых баллонах диоксид углерода использовался в количестве не более 15 кг, при выходе из баллонов газифицированной смеси температура ее менялась от нуля до минус 2 °С, а в жидкой фазе при сублимации – до минус 30 °С. Чистое время замораживания 400 ОЭ-2 (без учета времени устранения недостатков) равнялось примерно 2,5 часа, то есть производительность – 160 ОЭ-2 в час.

Постоянный контроль за содержанием воды в баллонах, большая трудоемкость работ по замене использованных баллонов, особенно в шахтных условиях, необходимость сложных устройств для их охлаждения или нагрева в



различные периоды года, использования цистерн только на поверхности шахты, высокая стоимость, соизмеримая со стоимостью жидкого азота являются основными препятствиями для использования диоксида углерода как хладоносителя при замораживании ОЭ-2.

Достоинства использования сжатого воздуха как хладоносителя приведены в подразделе 7.3, а поэтому рассмотрим возможные источники его получения на угольных предприятиях.

Многие шахты (свыше 30 %) оснащены стационарными компрессорными станциями, которые обеспечивают сжатым воздухом технологическое оборудование в горных выработках в количестве не менее 10 м<sup>3</sup>/мин при давлении от 0,5 до 0,7 МПа.

При отсутствии на шахте стационарной компрессорной станции в качестве источника сжатого воздуха могут быть использованы (на время ликвидации последствий аварии) передвижные компрессоры типа УКВШ-15/7 или УКВШ-5/7 с характеристиками: рабочее давление 0,7 и 0,6 МПа, производительность 15 и 5 м<sup>3</sup>/мин, максимальная температура воздуха на выходе из компрессоров в летний период времени 85 °С.

В горных выработках источником сжатого воздуха может служить магистральная или участковая пневмосеть. В некоторых выработках при отсутствии пневмосети применяют компрессоры. Температура воздуха в пневмосети практически равна температуре воздуха в выработках и может меняться от 20 до 35 °С, а давление сжатого воздуха – от 0,45 до 0,55 МПа. По длине пневмотрубопровода установлены водосборники, из которых периодически удаляют конденсат.

Разработать математическую модель по определению необходимой производительности технических средств или расхода ОЭ-2,  $N_p$  в час, практически невозможно, так как она является многофакторной зависимостью, которую можно представить в следующем виде [25]:

$$N_p = f_1(n_{\text{п}}, n_{\text{с}}, n_{\text{оэ}}, N_0, S_{\text{п}}, \tau_{\text{р}}, \tau_0, \tau_{\text{д}}, \tau_{\text{с}}), \quad (7.1)$$

где  $n_{\text{п}}$  – количество применяемой при ликвидации аварий одежды (курток, костюмов) ед;

$n_{\text{с}}$  – количество снаряжений одежды новыми ОЭ-2 с учетом времени защитного действия, ед;

$n_{\text{оэ}}$  – количество ОЭ-2, необходимое для снаряжения одной единицы одежды, ед.;

$N_0$  – начальный запас ОЭ-2, находящийся в подразделениях ГВГСС, обслуживающих данную шахту;

$S_{\text{п}}$  – площадь прицепа, на котором должны располагаться технические средства, м<sup>2</sup>;

$\tau_{\text{р}}$  – допустимое время пребывания горноспасателей в одежде в зоне повышенных температур, ч;

$\tau_0$  – время отдыха горноспасателей на свежей струе между заходами в ЗПТ, ч.

$\tau_d$  – время доставки ОЭ-2 к месту ведения горноспасательных работ от пункта нахождения подразделений ГВГСС, ч;

$\tau_c$  – время работы горноспасателей при ликвидации аварий, ч.

В свою очередь, допустимое время  $\tau_p$  является функциональной зависимостью вида

$$\tau_p = f_2(T, B, v, \Phi_m), \quad (7.2)$$

Время доставки ОЭ-2  $\tau_d$  равно сумме

$$\tau_d = \tau_1 + \tau_2, \quad (7.3)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – время доставки ОЭ-2 от пункта нахождения подразделений ГВГСС на аварийную шахту в горные выработки на подземную базу и к месту ведения аварийно-спасательных работ, соответственно, ч.

Кроме этого, согласно табелю оснащения каждое отделение ГВГСС при выезде на аварийную шахту должно иметь при себе не менее 120 замороженных ОЭ-2. В начальной стадии аварии в шахте должны находиться не менее двух отделений с куртками ТК-50: одно в ЗПТ, второе – в резерве на подземной базе, то есть запас ОЭ-2  $N_0$  должен быть равным 240 ед.

Максимальное количество замороженных ОЭ-2, которые находятся в каждом отряде и могут быть доставлены на аварийную шахту равно 8400 ед. Однако, срок их хранения в теплоизолирующих контейнерах при температуре 30 °С равен 8 ч, и использовать их за этот период времени, как правило, невозможно, а время хранения ОЭ-2 в вагонетке-термосе вместимостью около 800 ед. при температуре воздуха окружающей среды от 25 °С до 35 °С составляет 20 и 16 ч соответственно.

Поэтому используем приближенный метод для определения необходимого расхода ОЭ-2 с учетом статистических данных.

Будем считать, что площадь прицепа  $S_p$ , на которой должны размещаться технические средства, достаточна, а среднее время доставки ОЭ-2 в контейнерах на подземную базу  $\tau_1$  равно 2 ч, за которое они находятся в замороженном виде. Тогда производительность или расход ОЭ-2 в час (7.1) примет вид

$$N_p = f_1(n_p, n_c, n_{оэ}, N_0, S_p, \tau_p, \tau_0, \tau_1, \tau_c) \quad (7.4)$$

При работе горноспасателей в противогазотепловых костюмах проблем с обеспечением ОЭ-2 не возникает, а доля аварийно-спасательных работ в экстремальных микроклиматических условиях в куртках ТК-50 составляет 98 %.

В связи с этим, необходимую производительность технических средств можно определить по статистическим данным при наиболее частом приме-

нении курток ТК-50 в результате ликвидации последствий аварий за последние четыре года.

Расход ОЭ-2 в час без учета начального его запаса определим по зависимости

$$N_{p0} = n_{\text{п}} n_{\text{с}} n_{\text{оэ}} / \tau_{\text{общ}}; \quad \tau_{\text{общ}} = \tau_1 + \tau_0 + \tau_{\text{с}}, \quad (7.5)$$

а общее количество ОЭ-2 ( $N_{\text{оэ}}$ , ед), необходимое для ликвидации аварий имеет вид

$$N_{\text{оэ}} = n_{\text{п}} n_{\text{с}} n_{\text{оэ}}. \quad (7.6)$$

С учетом начального запаса  $N_0$  зависимость для определения расхода ОЭ-2 примет вид

$$N_{\text{р}} = (N_{\text{оэ}} - N_0) / \tau_{\text{общ}}. \quad (7.7)$$

Согласно технической характеристике куртки ТК-50 могут быть использованы при температуре окружающей среды 60 °С со временем защитного действия 10 мин. Однако, как правило, их применяют при температуре до 40 °С, так как в этом диапазоне ее изменения применяют костюмы ТК-60М со значительно большим временем защитного действия.

Среднее значение температуры окружающей среды, при которой горноспасатели находятся в выработках: при движении, выполнении работ, отдыхе, равно 32 °С.

Следовательно

$$\tau_{\text{р}} = \tau_0 = 2 \text{ ч}, \quad n_{\text{с}} = 2, \quad n_{\text{оэ}} = 16.$$

С учетом вышеприведенных зависимостей и имеющихся статистических данных определим расход за последние четыре года и количество ОЭ-2, необходимые при ликвидации различных аварий (табл. 7.4).

Результаты расчета показывают, что среднее значение производительности технических средств с учетом начального запаса должно быть 160, а максимальное – 190 ОЭ-2 в час.

Производительность шахтных передвижной и переносной установок может быть значительно меньшей, ввиду отсутствия необходимости тратить время по сравнению с наземной установкой на доставку ОЭ-2 с поверхности шахты в горные выработки, однако, оно является переменной величиной и должно учитываться в каждом конкретном случае при ликвидации аварий согласно тактике применения технических средств, которая будет приведена ниже.

Расход и общее количество ОЭ-2 при ликвидации аварий  
в куртках ТК-50

Номер данных	Исходные данные			Результаты расчета	
	Количество курток, $n_{\text{п}}$ , ед	Общее время ра- боты, $\tau_{\text{общ}}$ , ч	Использо- вано ОЭ-2, $N_{\text{оэ}}$ , ед	Расход ОЭ-2, $\text{ч}^{-1}$	
				$N_{\text{р0}}$	$N_{\text{р}}$
1	24	57	10944	192	188
2	20	48	7680	160	155
3	25	5	1000	200	152
4	23	18	3312	184	171
5	25	3	600	200	120
6	24	20	3840	192	180
7	25	24	4800	200	190
8	20	6	960	160	120
9	24	20	3840	192	180
10	25	10	2000	200	176
11	20	9	1440	160	133
Итого	255	220	40416	—	—
Среднее	23	20	3674	185	160
$\sigma$	1,77	12,55	2315,11	14,15	22,15

В последнее время горноспасатели используют так называемый «веерный» способ ликвидации аварий, заключающийся в том, что за первым отделением, которое выполнило свою часть аварийно-спасательных работ и возвращается на подземную базу, идет второе и так далее.

Определим расход ОЭ-2 в этом случае. Допустим, что начальный запас ОЭ-2, равный 8400 ед., будет периодически доставлен на аварийную шахту, причем такие факторы, как  $n_c = 1$  и  $\tau_0 = 0$ , а количество курток ТК-50 и общее время ликвидации аварий примем согласно табл. 2.3. В результате получим, что максимальный расход ОЭ-2 равен 145 ед. (номер данных 2). Однако, в дальнейшем при разработке технических средств необходимо стремиться обеспечить максимальную их производительность.

На основании анализа литературных источников, основных требований к техническим средствам, а также результатов предварительных экспериментальных исследований разработаны технологические схемы наземной, шахтных передвижной и переносной воздушно-морозильных установок, с использованием турбохолодильников и вихревых труб.

Схема наземной установки приведена на рис. 7.5 [23].

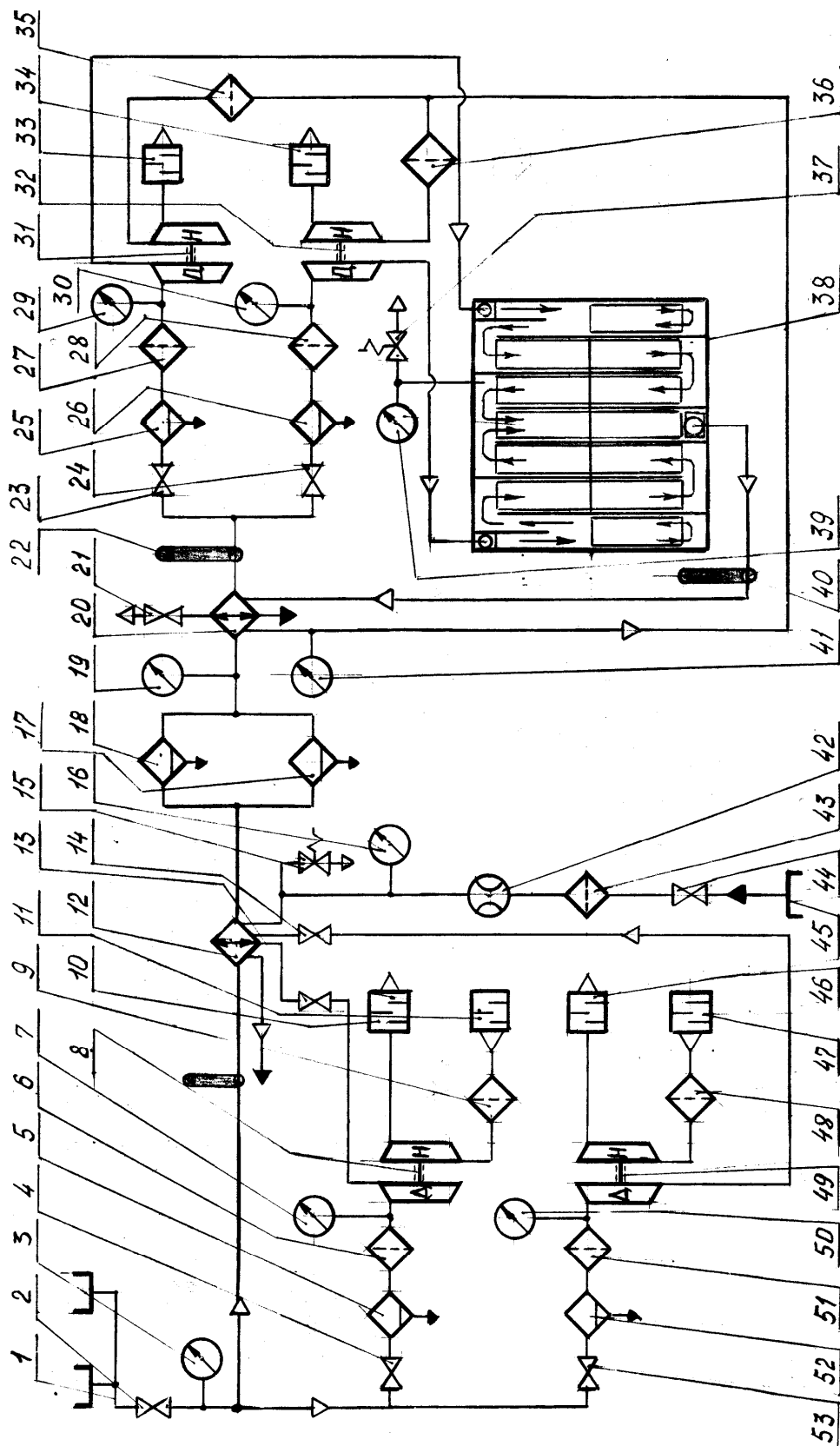


Рис. 7.5 – Технологическая схема наземной морозильной установки

1 – коллектор; 2, 4, 23, 24, 44, 53 – краны; 3, 7, 16, 29, 30 – манометры; 5, 17, 18, 25, 26, 52 – фильтры-влагоотделители; 6, 27, 28, 35, 36, 51 – фильтры; 8, 31, 32, 49 – турбохолодильники; 10, 11, 33, 34, 45, 47 – глушители шума; 12 – теплообменник предохлаждения воздуха; 20 – теплообменник-рекуператор; 13, 14 – отсекающие вентили; 15, 37 – предохранительные клапаны; 39, 41 – мановакуумметры; 21 – регулировочный вентиль; 22, 40 – термометры; 38 – холодильная камера; 42 – счетчик воды; 43 – фильтр очистки воды; 45 – патрубок подвода воды.

Отличительной особенностью разработанной технологической схемы от приведенных в литературных источниках (см. подраздел 7.2) является то, что в ней предусмотрено наличие четырех турбохолодильников, двух теплообменников, большого количества фильтров, холодильной камеры с секционным расположением ОЭ-2 для более равномерного распределения в ней воздуха, ох-

лаждение сжатого воздуха в теплообменниках перед его подачей в турбохолодильники за счет расширения воздуха в турбохолодильнике или воды, а также охлажденным воздухом, выходящим из камеры.

Согласно схеме установка должна работать (движение воздуха показано стрелками) следующим образом: сжатый воздух от компрессорной станции или от пневмосети под давлением поступает по рукавам, входящим в комплект принадлежностей, к коллектору и, проходя через кран 2, разделяется на два потока: один к детандерам турбохолодильников 31, 32 холодильной камеры 38, второй – к детандерам турбохолодильников 8, 49. Сжатый воздух, проходящий через теплообменник 12, охлаждается с помощью воздуха, расширенного в детандерах 8, 49. До поступления в детандеры турбохолодильников сжатый воздух, проходя через краны 4, 53, очищается от капельной влаги и масла в фильтрах влагоотделителей 5, 52 и фильтрах 6, 51, которые вместе с турбохолодильниками 8, 49, глушителями шума 10, 12, 46, 47 и фильтрами 9, 48 входят в состав агрегатов турбохолодильников. Давление воздуха на входе в детандеры турбохолодильников 8, 49 контролируется по манометрам 7, 50, регулируется кранами 4, 53 и должно равняться  $(0,37 \pm 0,02)$  МПа в момент пуска и начальный период работы установки. В дальнейшем это давление поддерживается, как правило, меньшим или равным давлению перед детандерами турбохолодильников 31, 32, чтобы температура сжатого воздуха, контролируемая термометром 22, находилась в пределах

2 ... 19 °С (согласно технической характеристике турбохолодильника температура на его входе не должна быть ниже 0 °С). Предварительно охлажденный сжатый воздух после теплообменника 12 проходит фильтры-влагоотделители 17, 18, теплообменник 20, краны 23, 24, фильтры-влагоотделители 25, 26 и через фильтры 27, 28 агрегатов турбохолодильников входит в детандеры турбохолодильников 31, 32 холодильной камеры 38. Расширенный в детандерах турбохолодильников 31, 32 воздух поступает в холодильную камеру 38 и замораживает охлаждающие элементы ОЭ-2, а затем, пройдя по межтрубной полости теплообменника 20, фильтры 35, 36, нагнетатели турбохолодильников 31, 32, выходит из установки в окружающую среду. При работе установки кран 21 должен быть открыт, что обеспечивает минимальное избыточное давление в межтрубной полости теплообменника 20. Выделяющаяся из потока воздуха в теплообменниках 12, 20, фильтрах 17, 18, 25, 26, 5, 52 жидкость удаляется из изделия через вентили.

При охлаждении сжатого воздуха в теплообменнике 12 с помощью воды, поступающей через межтрубную его полость, предварительно необходимо перекрыть шиберами отсекаелей потока воздуха 13, 14 патрубки на выходе из детандеров турбохолодильников 8, 49. Водопользующее устройство подключают к патрубку теплообменника 12, а вход соединяют с водопроводом шахтной сети. Расход воды регулируют с помощью крана 44, а после теплообменника 12 через его выходной патрубок она сбрасывается в ливневую канализацию.

Воздух с отрицательной температурой с двух сторон в верхней части поступает в холодильную камеру 38, в которой находятся охлаждающие элемен-

ты, и выходит в средней нижней его части. Внутренний объем камеры разделен на секции, которые должны обеспечить более равномерное распределение воздуха а, следовательно, и замораживание ОЭ-2. В крайних секциях, в нижней части камеры, размещены по одному контейнеру, в остальных пяти – по два, расположенных один на другом. Объем камеры позволяет разместить 12 контейнеров по 25 ОЭ-2 в каждом, то есть 300 ед.

Предусмотрено расположение наземной морозильной установки на прицепе вместо холодильника установки «Зима-А» или использование ее самостоятельно при замораживании ОЭ-2 на поверхности шахты.

С учетом вышеприведенных требований и необходимого расхода ОЭ-2 разработана технологическая схема передвижной шахтной морозильной установки с использованием турбохолодильников (рис. 7.6) [24].

Составные части и принцип работы данной установки аналогичны наземной установке, за исключением применения двух турбохолодильников 19, 37 вместо четырех, меньшего количества фильтров и размера холодильной камеры 21, в которой в семи контейнерах должны находиться 175 ОЭ-2, а холодный воздух после турбохолодильника 19 входит в верхнюю ее часть и выходит в теплообменник-рекуператор 13 из нижней части.

Предусмотрено передвижение установки по рельсовому пути шириной колеи 600 и 900 мм, а ее доставка к шахте может быть осуществлена на любом грузовом автомобиле.

Как отмечено в подразделе 7.3, вихревые трубы применяются, в основном, для кондиционирования или получения холода в сравнительно малых объемах с тщательной очисткой воздуха, то есть исследования о возможности применения их в установках для замораживания ОЭ-2 проводятся впервые. Установка должна быть переносной, массой не более 40 кг и обеспечить замораживание ОЭ-2 в горных выработках шахт от пневмосети.

Схемы переносной шахтной установки с вихревыми трубами и вихревой трубы приведены на рис. 7.7 и 7.8 [23].

В состав установки входят следующие основные части: холодильная камера 9 с крышкой 13, в которой расположены контейнеры 11 с ОЭ-2 и ложементы 12, вихревые трубы 5 с оребрением, коллектор 6 для подвода сжатого воздуха к вихревым трубам, эжектор 8, камеры соответственно горячего 4, холодного воздуха 14 и предохлаждения вихревых труб 17, фильтр-влагодотделитель 1, манометр 2, термометры 3 и 16, трубопровод 15.

Сжатый воздух от пневмосети по коллектору поступает в вихревые трубы, в которых происходит разделение на холодный и горячий потоки. Горячий поток направляется в камеру 4, эжектор 8 и выходит в окружающую среду, холодный поток – в холодильную камеру с ОЭ-2, в камеру холодного воздуха 14 по трубопроводу 15 в камеру предохлаждения вихревых труб 17 и через эжектор 8 выходит в окружающую среду.

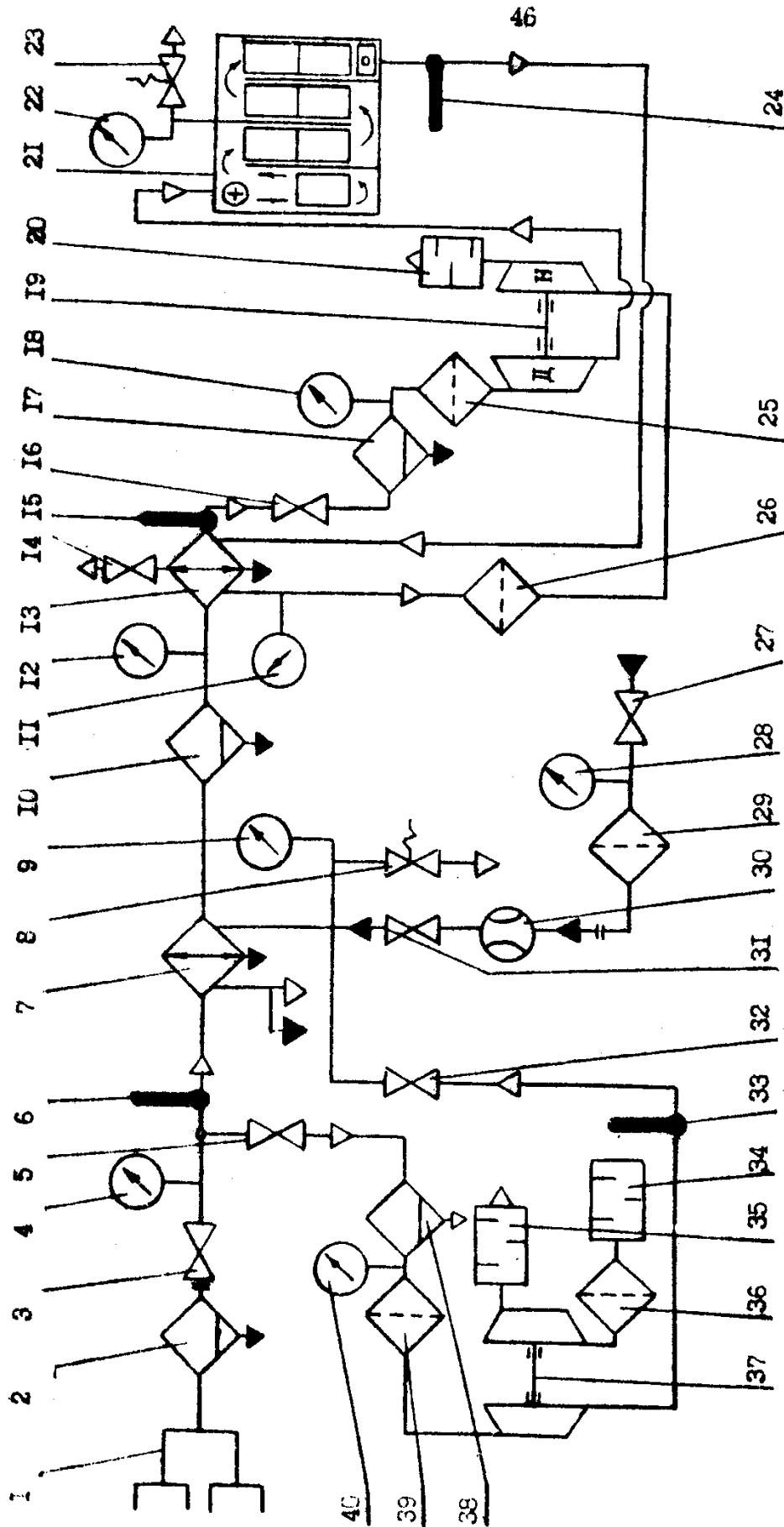


Рис. 7.6 – Технологическая схема передвижной шахтной морозильной установки

1 - коллектор; 2 - циклон; 3, 5, 14, 16 - краны; 4, 9, 12, 18, 28, 40 - манометры; 6, 15, 24, 33 - термометры; 7 - теплообменник предохлаждения; 8, 23 - клапаны предохлаждения; 10, 17, 38 - теплообменник-рекуператор; 11, 22 - мановакуумметры; 13 - теплообменник-рекуператор; 19, 37 - турбоохладители; 20, 34, 35 - нагреватели; 25, 39 - фильтр агрегата турбоохладительного; 27 - кран; 29 - фильтр; 30 - счетчик воды приставки водофильтрующей; 31, 32 - шиберы; 21 - камера морозильная; 26, 36 - фильтры



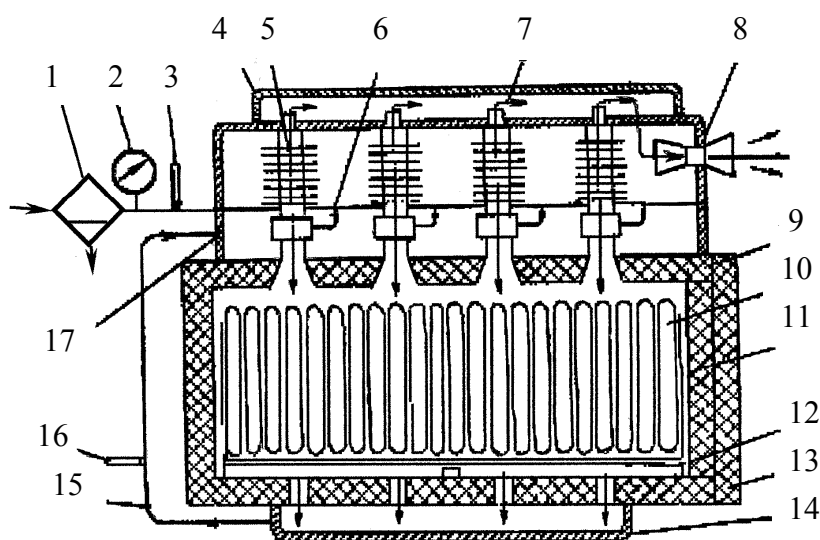


Рис. 7.7 – Схема переносной морозильной установки с вихревыми трубами:

1 – фильтр-влагоотделитель; 2 – манометр; 3 – термометр; 4 – камера горячего воздуха; 5 – вихревая труба; 6 – коллектор; 7 – горячий поток воздуха; 8 – эжектор; 9 – холодильная камера; 10 – охлаждающий элемент; 11 – контейнер; 12 – ложемент; 13 – крышка камеры; 14 – камера холодного воздуха; 15 – трубопровод; 16 – термометр; 17 – камера предохлаждения вихревых труб

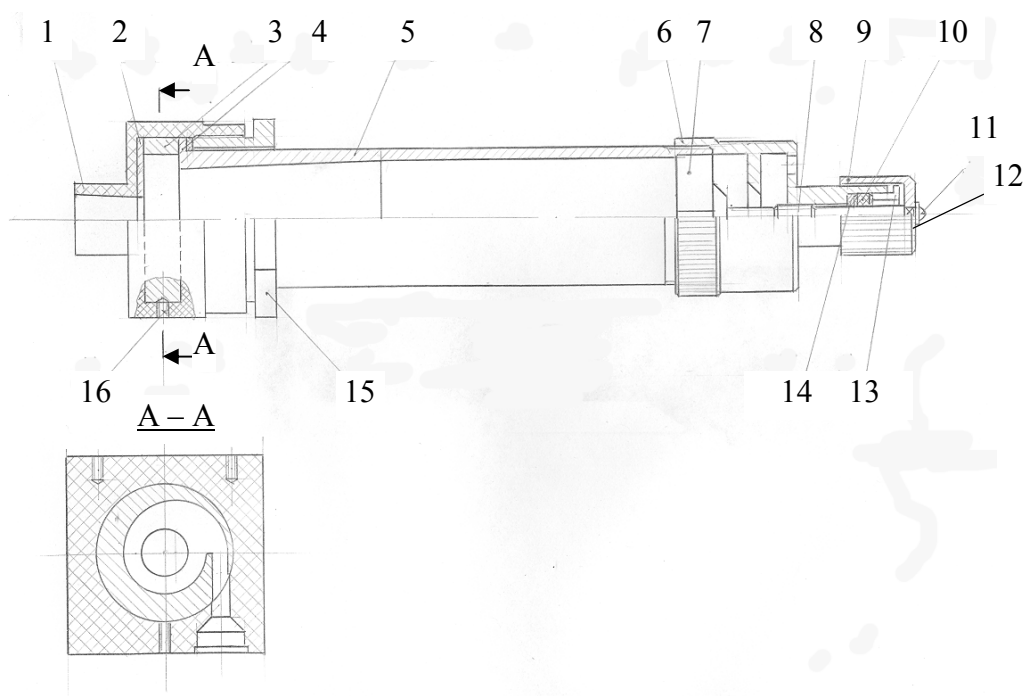


Рис. 7.8 – Вихревая труба

1 – корпус; 2 – диафрагма; 3 – сопло; 4 – прокладка; 5 – труба; 6 – гайка; 7 – выпрямитель; 8 – шток; 9 – ручка; 10 – уплотнитель; 11 – винт; 12 – шайба; 13 – гайка; 14 – шайба; 15 – гайка; 16 – винт

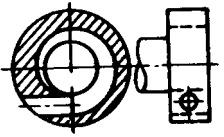
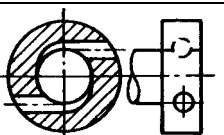
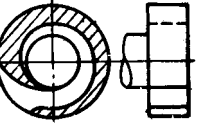
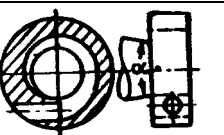
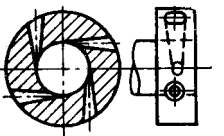
В связи с тем, что переносная установка должна быть использована в горных выработках шахт с температурой поступающего в нее сжатого воздуха из пневмосети, в ней отсутствуют такие громоздкие составные части, как теплообменники предохлаждения и рекуперации с устройством для регулировки воздушного потока, что значительно упрощает конструкцию и уменьшает массу установки.

Вихревая труба состоит из следующих основных элементов: корпуса 1, диафрагмы 2, с осевым отверстием, тангенциального сопла 3, цилиндрической трубы 4, выпрямителя 7, гайки 13. При поступлении сжатого воздуха через сопло образуется интенсивный круговой поток, приосевые слои которого охлаждаются и отводятся через диафрагму в виде холодного потока, а периферийные слои нагреваются и выходят через выпрямитель в виде горячего потока. По мере прикрытия выпрямителя гайки 13 общий уровень давления в вихревой трубе повышается и расход холодного потока через отверстия диафрагмы увеличивается при соответствующем уменьшении расхода горячего потока. При этом температуры холодного и горячего потоков также изменяются.

Известно несколько конструктивных вариантов вихревых труб (табл. 7.5), которые отличаются конструкцией соплового входа сжатого воздуха и длиной их цилиндрической части (вихревой зоны) в калибрах.

Учитывая простоту конструкции и высокую эффективность, нами выбрана вихревая трубка с конструкцией соплового входа А.П. Меркулова (табл. 7.5). Контейнер с ОЭ-2 (рис. 7.9) представляет собой прямоугольную каркас-корзину, конструктивно выполненную из отдельных полосок 1 из нержавеющей стали шириной 12 мм и толщиной 2 мм. Полоски сварены между собой контактной точечной сваркой. Ко дну приварены равномерно и параллельно в продольном направлении две опорные планки 2 для равномерной фиксированной установки ОЭ-2 3 в пазы. Дополнительно посередине в поперечном направлении между продольными полосками протянуты проволочные перемычки 4 для фиксации охлаждающих элементов с одинаковыми расстояниями между собой (2-3 мм) с тем, чтобы поток холодного воздуха в вертикальном направлении поступал более равномерно к обеим сторонам ОЭ-2.

Конструкция и размеры исследованных вихревых труб

№ трубы	Автор	Конструкция соплового входа	Диаметр вихревой трубы $D$ , мм	Площадь соплового входа $F_c$ , мм <sup>2</sup>	Диаметр отверстия диафрагмы $D_d$ , мм	Длина вихревой зоны, в калибрах	Примечание
1	Р. Хилш		4,6 9,6 17,6	0,95 4,15 13,2	2,2 4,3 6,5	50 50 50	Круглое сопло
2	В. С. Мартыновский и В. П. Алексеев		4,1 9,0 16,0 28,0	0,8 8,3 24,0 56,5	1,5 4,5 7,5 12,0	67 50 50 50	Двухсопловый вход
3	А. П. Меркулов		10 16 20 25 33	7,6 18 30 47 84	4,5 7,2 9 11 14,5	9 9 9 9 9	Прямоугольное сопло
4	В. П. Хендал		10	7	6	4	Коническое сопло $\alpha = 7^\circ$
5	С. Д. Фултон		6,1	0,8	1,75	33	Четырех- и шести-сопловые входы

Для определения параметров наземной, передвижной и переносной шахтных воздушно-морозильных установок проведем теоретические исследования теплообменных и гидравлических процессов в системе «источник

хладоносителя – средства экстренного получения холода – водоледяные охлаждающие элементы».

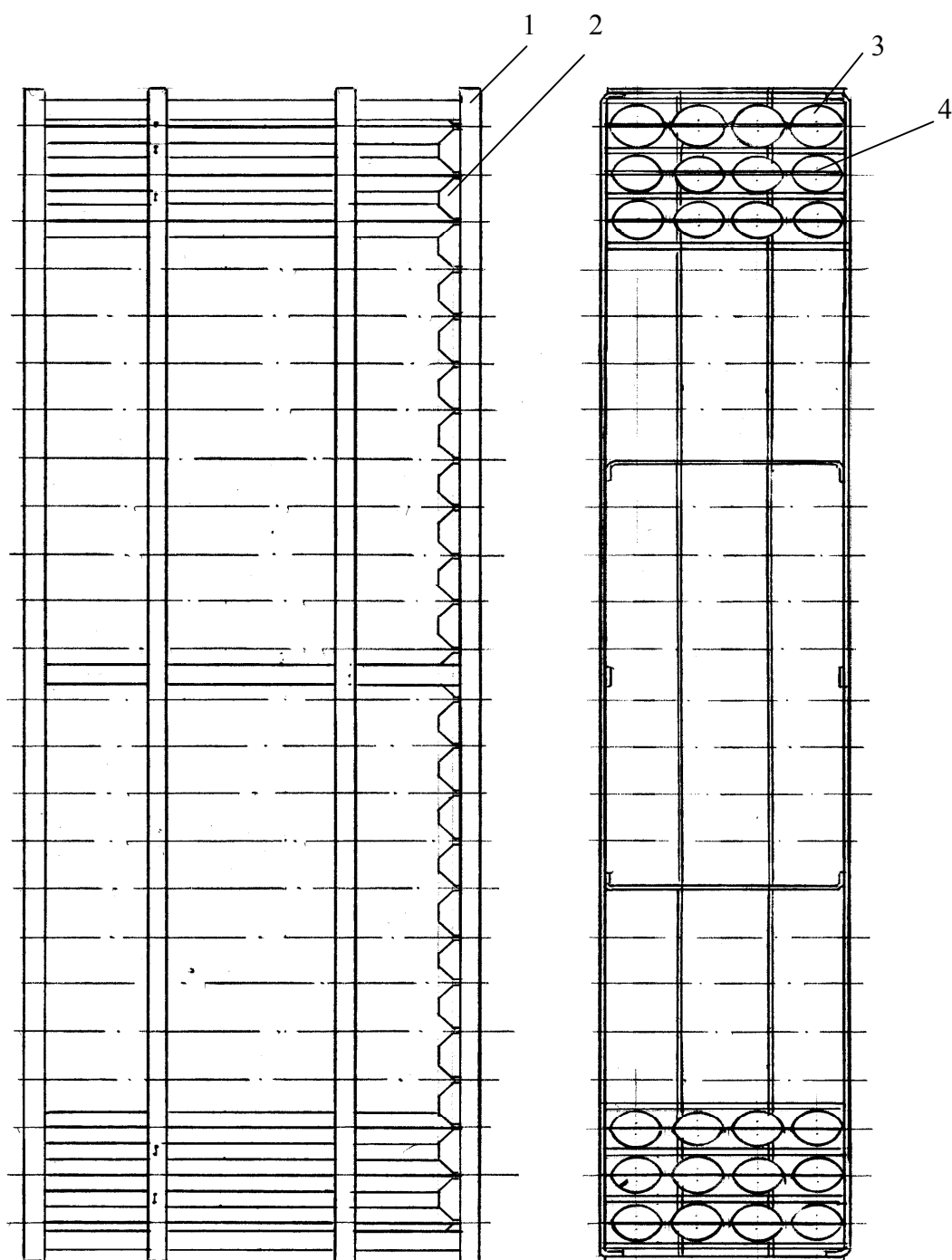


Рис. 7.9– Контейнер с ОЭ-2:  
 1– полоски; 2 – планки опорные;  
 3 – элемент охлаждающий;  
 4 – перемычки проволочные

7.4. Теоретические исследования теплообменных и гидравлических процессов в системе «источник хладоносителя – средства экстренного получения холода – водолеянные охлаждающие элементы»

7.4.1. Теплообменные процессы в установке с использованием турбохолодильников

Рассмотрим расчетную схему установки (рис. 7.10), состоящую из пневмотрубопровода I, двух ребристотрубных теплообменников II и III, турбохолодильников типа 1277 ТД IV, VI и холодильной камеры V, соединенных между собой трубопроводной арматурой. Предварительное охлаждение поступающего в теплообменник II сжатого воздуха может осуществляться холодным воздухом из турбохолодильника VI, или водой [25,26].

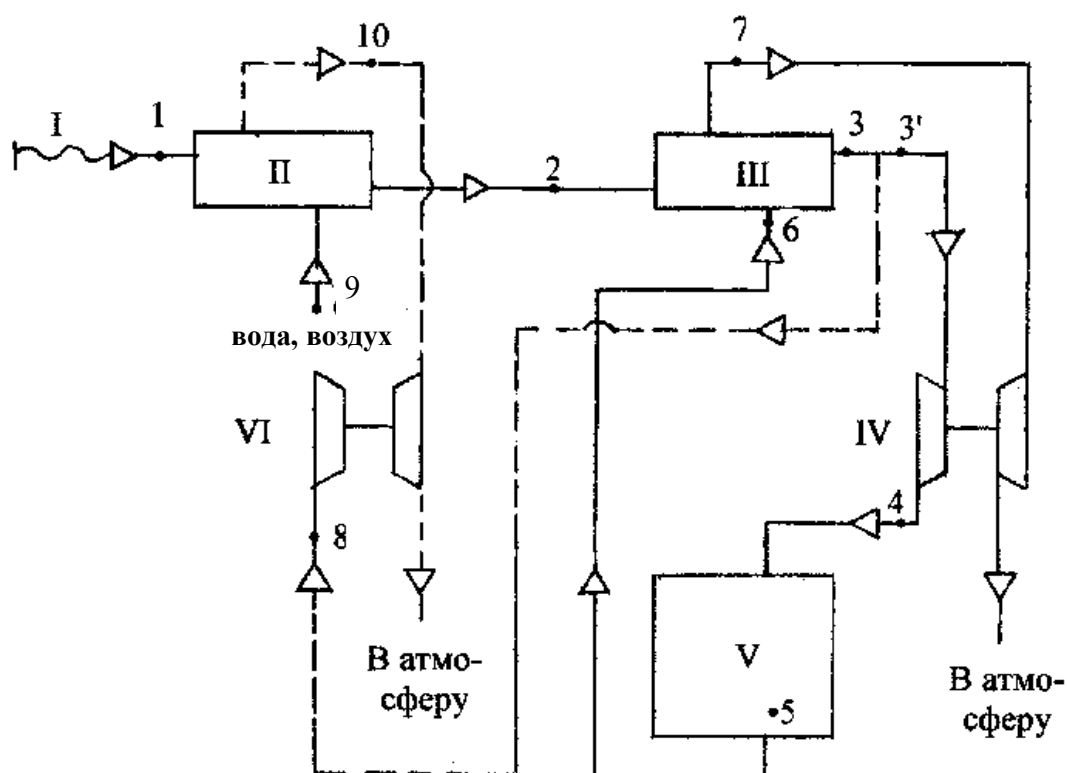


Рис. 7.10. – Схема воздушно-морозильной установки:

I – пневмотрубопровод; II – теплообменник предохлаждения; III – рекуперативный теплообменник; IV, VI – турбохолодильники; V – холодильная камера; 1,2 – вход воздуха в теплообменник II и выход из него; 3,4 – выходы из теплообменника III и турбодетандера IV; 5 – точка холодильной камеры V; 6,7 – выходы из холодильной камеры и теплообменника III; 8 – вход в турбохолодильник VI; 9, 10 – вход и выход воды из теплообменника II

Работа установки при водяном предохлаждении теплообменника за-

ключается в следующем. Горячий и влажный воздух от компрессорной станции поступает по пневмотрубопроводу к фильтрам для его очистки от влаги, масла и механических включений (на рисунке не показано), проходит трубное пространство теплообменника предохлаждения II, трубное пространство рекуперативного теплообменника III, турбохолодильник IV, где за счет резкого расширения охлаждается и направляется в холодильную камеру V, в которой отбирает тепло у элементов ОЭ-2, выходит из нее, проходит межтрубное пространство рекуперативного теплообменника, охлаждая его, и выходит в атмосферу. В то же время вода подается в межтрубное пространство теплообменника II, (точка 9), предварительно охлаждая его, и выходит в окружающую среду.

Отличие в работе установки с турбохолодильным охлаждением (воздухом) состоит в том, что производится дополнительный отбор охлажденного воздуха из рекуперативного теплообменника III, его подача в турбохолодильник VI, где он дополнительно охлаждается за счет расширения, после чего подается в межтрубное пространство теплообменника II, охлаждает его и выходит в атмосферу (см. рис. 7.10, штриховая линия 3 – 8 – 9 – 10).

Такие схемы воздушных морозильных установок в литературных источниках отсутствуют, а, следовательно, не исследованы теплообменные и гидравлические процессы, происходящие в их составных элементах с учетом процесса замораживания водяных охлаждающих элементов в холодильной камере.

Процесс замораживания ОЭ-2 в холодильной камере будет происходить интенсивно (без снеговыведения), если в неё будет поступать из турбохолодильника IV сухой воздух с соответствующей температурой и скоростью. В то же время эти параметры зависят от давления и температуры на входе в турбохолодильник, причем, чем ниже положительная температура и выше давление (но не более 0,4 МПа), поступающего в турбохолодильник воздуха, тем ниже температура и больше скорость движения воздуха в холодильной камере. Кроме того, эти параметры воздуха зависят, в основном, от конструктивных параметров теплообменников, выбранного процесса предохлаждения (воздухом от турбохолодильника или водой водофильтрующего устройства), параметров сжатого воздуха (расхода, давления, влажности и температуры), а также температуры окружающей среды.

Наземная и шахтная воздушно-морозильные установки могут работать при различных температурах окружающей среды (на поверхности и в выработках шахт) и температуры сжатого воздуха (компрессорные станции, шахтный пневмотрубопровод), то есть температура окружающей среды может принимать значения от плюс 35 – (в тени) до минус 30 °С в зависимости от периода времени года, а температура сжатого воздуха – от 20 до 85 °С (см. подраздел 7.2).

Приведем описание процессов теплообмена в системе «теплообменник предохлаждения – рекуперативный теплообменник – турбохолодильник – холодильная камера» (см. рис. 7.10), исследование которых позволит определить адекватность выбора и расчета конструктивных параметров теплообменников, обеспечивающих создание минимальной положительной темпера-

туры на входе в турбохолодильник IV, а, следовательно, максимально низкую температуру в холодильной камере.

Вначале рассмотрим процессы теплообмена в указанной выше системе морозильной установки, где межтрубное пространство теплообменника предохлаждения заполняется водой. Считаем, что теплообменники являются адиабатическими системами.

Для удобства дальнейшего изложения введем соответствие между значениями индексов рассматриваемых параметров и нумерацией узлов системы  $j = 1, \dots, 10$  (см. рис. 7.10). Индекс «в» соответствует параметрам воздуха, «ж» – параметрам воды, «п» – параметрам водяного пара.

Пусть поступающий из трубопровода влажный, горячий воздух, характеризующийся давлением  $P_{B1}$ , Па; температурой  $T_{B1}$ , К; расходом  $G_{B1}$ , кг/с; удельной теплоемкостью  $c_{pB}$ , Дж/(кг·К); и влагосодержанием  $d_1$ , поступает в трубное пространство водовоздушного теплообменника (предохлаждения) II. Температура воды  $T_{ж9}$ , ее расход  $G_{ж9}$  (в дальнейшем, если отдельно не оговорено, то температура  $T$  измеряется в К; расход  $G$  в кг/с; теплоемкость  $c_p$  в Дж/(кг·К), – независимо от нижнего индекса).

На выходе из теплообменника II параметры воздуха будут следующими: давление  $P_{B2}$ , температура  $T_{B2} < T_{B1}$  и влагосодержание насыщенного пара  $d_2$ .

Снижение мощности тепловой энергии нагретого влажного воздушного потока в пределах теплообменника II:  $Q_{1,2}$ , Вт, равно повышению тепловой энергии воды  $Q_{ж9,10}$  после прохождения этого теплообменника.

Величина  $Q_{1,2}$  складывается из снижения теплосодержания сухого воздуха:

$$Q_{C1,2} = c_{pB} \cdot (G_{B1}T_{B1} - G_{B2}T_{B2});$$

снижение теплосодержания пара:

$$Q_{П1,2} = c_{pП} \cdot (G_{П1}T_{B1} - G_{П2}T_{B2});$$

и скрытой теплоты парообразования сконденсированной влаги и выпавшего в осадок пара, оставшейся в теплообменнике:

$$Q_{K1,2} = (G_{K2} - G_{K1}) \cdot r_{п},$$

где  $k$  – индекс сконденсированной влаги;  
 $r_{п}$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.  
 Следовательно

$$Q_{1,2} = Q_{C1,2} + Q_{П1,2} + Q_{K1,2} = Q_{ж1,2}.$$

Определим величины этих трех составляющих теплосодержания.

Влагосодержание  $d_n$  насыщенных паров выражается зависимостью от давления

$$d_n = 0,622 \frac{P_n}{P_6 - P_n}, \quad (7.8)$$

где  $P_n$  – давление насыщенных паров, МПа;

$P_6$  – барометрическое давление, МПа.

Давление насыщенных паров воды в исследуемом диапазоне температуры  $T$ , °С, с абсолютной погрешностью не более 0,3 % определяется по формуле

$$P_n = \exp\left(11,79 - \frac{3893,0}{T + 230,4}\right). \quad (7.9)$$

Доля водяного пара в точке 1

$$G_{П1} = G_{B1} \frac{d_1}{1 + d_1},$$

в точке 2

$$G_{П2} = G_{B2} \frac{d_2}{1 + d_2}.$$

Доля сухого воздуха в точках 1 и 2 остается неизменной:

$$G_{B1,2} = G_{B1} \frac{1}{1 + d_1} = G_{B2} \frac{1}{1 + d_2}.$$

Из указанных выше соотношений следует:

$$G_{K1} = G_{B1} \frac{d_1}{1 + d_1}; \quad G_{K2} = G_{B2} \frac{d_2}{1 + d_2} = G_{B1} \frac{d_2}{1 + d_1}; \quad G_{K1,2} = \frac{d_2 - d_1}{1 + d_1} G_{B1}.$$

Обозначим энтальпию водяного пара в точках 1 и 2 через  $i_{П1}$ ,  $i_{П2}$ .

$$i_{П1} = c_{ПП} T_1, \quad i_{П2} = c_{ПП} T_2,$$

где  $c_{ПП}$  – удельная теплоемкость водяного пара, Дж/(кг·К).

В результате, изменение мощности тепловой энергии воздушного потока  $Q_{1,2}$ , Вт, и потока воды  $Q_{9,10}$ , Вт, в пределах теплообменника II, можно определить по изменению их температуры следующим образом:

$$Q_{1,2} = G_{B1}(1 + d_1)^{-1} \cdot c_{PB}(T_1 - T_2) + G_{B1}(1 + d_1)^{-1} \cdot (d_1 \cdot i_{П1} - d_2 \cdot i_{П2}) + G_{K2,1} \cdot r_n = G_{B1}(1 + d_1)^{-1} [c_{PB}(T_{B1} - T_{B2}) + c_{ПП}(d_1 T_{B1} - d_2 T_{B2}) + (d_2 - d_1) r_n], \quad (7.10)$$



$$Q_{9,10} = c_{PЖ} G_{ж9} (T_{ж10} - T_{ж9}), \quad (7.11)$$

где  $G_{Bj}$ ,  $G_{жj}$  – расходы воздуха и воды соответственно, кг/с;

$T_{Bj}$ ,  $T_{жj}$  – температуры воздуха и воды, К;

$d_j$  – влагосодержание воздуха;

$c_{PB}$ ,  $c_{PЖ}$  – удельные теплоемкости воздуха, воды соответственно, Дж/(кг·К).

Так как  $Q_{1,2} = Q_{9,10}$ , то из выражений (7.10) и (7.11) получим первое уравнение для определения  $T_{B2}$  и  $T_{ж10}$ :

$$T_{B2} = T_{B1} - \frac{c_{PП}}{c_{PB}} (d_1 T_{B1} - d_2 T_{B2}) - \frac{c_{PЖ} G_{ж9}}{c_{PB} G_{B1}} (1 + d_1) (T_{ж10} - T_{ж9}) - \frac{1}{c_{PB}} (d_2 - d_1) r_{п}. \quad (7.12)$$

Каждый тип теплообменника имеет свои характеристики: коэффициент теплопередачи  $k_T$ , площадь теплообменной поверхности  $F_T$  и степень совершенства теплообменника  $\varepsilon_T$ .

Известно, что в теплообменнике количество теплоты  $Q_T$ , Вт, переданной от охлаждаемой среды охлаждающей определяется среднелогарифмическим температурным напором  $\Delta T$ , К

$$Q_T = \varepsilon_T k_T F_T \Delta T,$$

где для условий теплообменника II:

$$Q_{TII} = \varepsilon_{II} k_{II} F_{II} \Delta T_{II} = \frac{(T_{B1} - T_{ж10}) - (T_{B2} - T_{ж9})}{\ln \frac{T_{B1} - T_{ж10}}{T_{B2} - T_{ж9}}}. \quad (7.13)$$

Учитывая  $Q_{1,2} = Q_{TII}$ , получим второе уравнение для  $T_{B2}$  и  $T_{ж10}$ :

$$T_{ж10} = T_{ж9} + \frac{\varepsilon_{II} k_{II} F_{II}}{G_{ж9} c_{PЖ}} \cdot \frac{(T_{B1} - T_{ж10}) - (T_{B2} - T_{ж9})}{\ln \frac{T_{B1} - T_{ж10}}{T_{B2} - T_{ж9}}}. \quad (7.14)$$

Таким образом, используя (7.12) и (7.14), по температуре воздуха и воды на входе в теплообменник II, можем определить их значения на выходе из теплообменника, решая систему уравнений итерационным методом.

Перейдем к определению температуры на выходе из теплообменника III.

В теплообменнике III происходит рекуперация потоков поступающего воздуха в узел 2 и исходящего в узел 6 из холодильной камеры V.

Принимая равенство массовых расходов поступающего и исходящего потоков, для рекуперативного теплообменника III запишем уравнения теплового баланса:

$$Q_{2,3} = G_{B1}(1+d_2)^{-1}[c_{PB}(T_{B2} - T_{B3}) + c_{PII}(d_2T_{B2} - d_3T_{B3}) + (d_3 - d_2)r_{II}]; \quad (7.15)$$

$$Q_{6,7} = G_{B1}(1+d_6)^{-1}[c_{PB}(T_{B7} - T_{B6}) + c_{PB}(d_7T_{B7} - d_6T_{B6})]. \quad (7.16)$$

В отличие от (7.15), при вычислении  $Q_{6,7}$  в (7.16) наличием фазового перехода (конденсацией пара из воздуха по пути из 6 в 7) – пренебрегаем, кроме того, принято  $G_{B6} = G_{B1}$ , где  $G_{B6}$  – расход воздуха на выходе из камеры, равный разности между расходом воздуха  $G_{B1}$  в пневмотрубопроводе и утечками воздуха в атмосферу (узлы 7 и 8). Суммарная величина утечек считается известной.

Поскольку  $Q_{2,3} = Q_{6,7}$ , для определения  $T_{B3}$  и  $T_{B7}$  получаем первое уравнение:

$$T_{B3} = T_{B2} - \frac{c_{PII}}{c_{PB}}(d_2T_{B2} - d_3T_{B3}) - \frac{1+d_2}{1+d_6}[(T_{B7} - T_{B6}) + \frac{c_{PII}}{c_{PB}}(d_7T_{B7} - d_6T_{B6}) - \frac{1}{c_{PB}}(d_3 - d_2)r_{II}]. \quad (7.17)$$

Температуру воздуха на входе в теплообменник III в узле 6:  $T_{B6}$  принимаем равной температуре на выходе из холодильной камеры  $T_{B5}$ , которая определяется как  $T_{B5IX}$  при  $T_{BX} = T_{B4}$  в подразделе 3.3.

Другим уравнением для определения температуры  $T_{B3}$  и  $T_{B7}$  на выходе из теплообменника III с характеристиками  $\varepsilon_{III}$ ,  $k_{III}$  и  $F_{III}$ , является уравнение его теплового баланса

$$Q_{6,7} = Q_{III}$$

или

$$G_{B1} \frac{c_{PB} + d_6 c_{PII}}{1 + d_6} (T_{B7} - T_{B6}) = \varepsilon_{III} k_{III} F_{III} \frac{(T_{B2} - T_{B7}) - (T_{B3} - T_{B6})}{\ln \frac{T_{B2} - T_{B7}}{T_{B3} - T_{B6}}}, \quad (7.18)$$

Откуда

$$T_{B7} = T_{B6} + \varepsilon_{III} k_{III} F_{III} \frac{1 + d_6}{G_{B1}(c_{PB} + d_6 c_{PII})} \frac{(T_{B2} - T_{B7}) - (T_{B3} - T_{B6})}{\ln \frac{T_{B2} - T_{B7}}{T_{B3} - T_{B6}}}. \quad (7.19)$$

Система уравнений (7.17) и (7.19) относительно неизвестных  $T_{B3}$  и  $T_{B7}$  решается методом итераций, аналогично решению системы уравнений (7.12) и (7.14).

Зависимость между температурой  $T_{B4}$  на входе в холодильную камеру V и температурой  $T_{B3}$  на выходе из теплообменника III находим следующим образом.

Запишем уравнение теплового баланса турбохолодильника IV:

$$Q_{3,4} = G_{B3}(1+d_3)^{-1}[c_{PB}(T_{B3}-T_{B4})+c_{PI}(d_3T_{B3}-d_4T_{B4})-(d_3-d_4)(r_{\Pi}+r_{\text{л}})]=Q_{DIV}, \quad (7.20)$$

где  $r_{\text{л}}$  – скрытая теплота плавления льда, Дж/кг;

$Q_{DIV}$  – тепловая мощность турбохолодильника IV, Вт

$$Q_{DIV} = G_{B3}\sigma_S R_{\Gamma} T_{B3} \left(1 - \frac{1}{\pi_q^{1/\sigma_S}}\right) \eta_{Sq}, \quad (7.21)$$

где  $\sigma_S$  – число изоэнтропы,  $\sigma_S = m_a(m_a - 1)$ ;  $\pi_q = P_{B4} / P_{B3}$ ;

$m_a$  – показатель адиабаты, для воздуха  $m_a = 1,4$ ;

$\eta_{Sq}$  – изоэнтропный КПД турбодетандера, равный примерно 0,9.

Тогда из (7.20) и (7.21) следует зависимость между температурой в узлах 3 и 4:

$$T_{B4} = T_{B3} - \frac{1}{c_{PB} + c_{PI}d_4} [(d_3 - d_4)(r_{\Pi} + r_{\text{л}}) + (1 + d_3)\sigma_S R_{\Gamma} (1 - \pi_q^{1/\sigma_S}) \eta_{Sq} T_{B3}]. \quad (7.22)$$

При включении в схему дополнительно двух турбохолодильников для наземной установки изменится начальная температура сжатого воздуха  $T_{B1}$  и скорость поступающего в холодильную камеру холодного воздуха, а поэтому вышеприведенные уравнения описывают теплообменные процессы, происходящие в составных частях, как наземной, так и передвижной шахтной воздушно-морозильных установок.

Таким образом, для определения температуры в шести характерных точках: 2, 10, 3, 7, 4, 6 имеем систему пяти уравнений (7.12), (7.14), (7.17), (7.19), (7.22).

Температура на выходе из холодильной камеры установки (см. рис. 7.10, точка 6) зависит от температуры на входе в камеру в точке 4, количества замораживаемых ОЭ-2 и конструктивных параметров камеры: объема, толщины и материала теплоизолирующего слоя, как это показано в подразделе 7.3.

В случае турбодетандерного предварительного охлаждения теплообменника II его первое уравнение теплового баланса  $Q_{1,2} = Q_{9,10}$  записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{G_{B1}}{1+d_1} \cdot [c_{PB}(T_{B1} - T_{B2}) + c_{PI}(d_1 T_{B1} - d_2 T_{B2}) + (d_2 - d_1)r_{\Pi}] = \\ = \frac{G_{B3}}{1+d_3} \cdot [c_{PB}(T_{B10} - T_{B3}) + c_{PI}(d_{10} T_{B10} - d_3 T_{B3})]. \end{aligned}$$

Здесь конденсацией пара в охлаждающем потоке воздуха на участке 9 – 10 – пренебрегаем, и:  $G_{Ж9} = G_{B9} = G_{B8}$ ;  $G_{Ж10} = G_{B10}$ ;  $T_{Ж9} = T_{B8} = T_{B3}$ ;  $T_{Ж10} = T_{B10}$ ;  $d_9 = d_8 = d_3$ . Величина  $G_{B8}$  считается известной.

Второе уравнение  $Q_{9,10} = Q_{ТД}$ :

$$\begin{aligned} \frac{G_{B8}}{1+d_3} \cdot [c_{PB}(T_{B10} - T_{B3}) + c_{PI}(d_{10} T_{B10} - d_3 T_{B3})] = \\ = \varepsilon_{II} k_{II} F_{II} \frac{(T_{B1} - T_{B10}) - (T_{B2} - T_{B3})}{\ln \frac{T_{B1} - T_{B10}}{T_{B2} - T_{B3}}}. \end{aligned}$$

В результате

$$\begin{aligned} T_{B2} = T_{B1} - \frac{c_{PI}}{c_{PB}}(d_1 T_{B1} - d_2 T_{B2}) - \frac{G_{B8}}{G_{B1}} \frac{1+d_1}{1+d_3} [(T_{B10} - T_B) + \\ + \frac{c_{PI}}{c_{PB}}(d_{10} T_{B10} - d_3 T_{B3})] - \frac{r_{\Pi}}{c_{PB}}(d_2 - d_1); \\ T_{B10} = T_{B3} - \frac{c_{PI}}{c_{PB}}(d_{10} T_{B10} - d_3 T_{B3}) + \frac{\varepsilon_{II} k_{II} F_{II}}{c_{B8} \cdot c_{PB}} (1+d_3) \frac{(T_{B1} - T_{B10}) - (T_{B2} - T_{B3})}{\ln \frac{T_{B1} - T_{B10}}{T_{B2} - T_{B3}}}. \end{aligned}$$

Для теплообменника III используем уравнения (7.15), (7.16), и (7.18), в которые вместо  $G_{B1}$  подставляется  $(G_{B1} - G_{B8})$ . Поэтому температуру в точках 3 и 7 вычисляем таким образом:

$$\begin{aligned} T_{B3} = T_{B2} - \frac{c_{PI}}{c_{PB}}(d_2 T_{B2} - d_3 T_{B3}) - \frac{G_{B1} - G_{B8}}{G_{B1}} \frac{1+d_2}{1+d_6} [(T_{B7} - T_{B6}) + \\ + \frac{c_{PI}}{c_{PB}}(d_7 T_{B7} - d_6 T_{B6}) - \frac{1}{c_{PB}}(d_3 - d_2)r_{\Pi}]; \\ T_{B7} = T_{B6} + \frac{\varepsilon_{III} k_{III} F_{III}}{(c_{B1} c_{B8})(c_{PB} + d_6 c_{PI})} \frac{(T_{B2} - T_{B7}) - (T_{B3} - T_{B6})}{\ln \frac{T_{B2} - T_{B7}}{T_{B3} - T_{B6}}}. \end{aligned}$$

Температура  $T_{B4}$  вычисляется по той же формуле (7.22), а при вычислении  $T_{B6}$  для определения скорости потока на входе в камеру используется не  $G_{B1}$ , а  $G_{B1} - G_{B8}$ .

Поскольку температура на выходе из холодильной камеры  $T_{B6}$  изменяется во времени, то зависящие от нее величины  $T_{B6}, T_{B7}, T_{B3}, T_{B4}$ , а при турбодетандерном охлаждении и  $T_{B9}$  – не являются стационарными и в свою очередь распределение температуры в этих характерных узлах магистрали морозильной установки влияет на процесс замораживания ОЭ (через температуру  $T_{B4}$  на входе в камеру).

Поэтому расчет динамики температуры в магистрали морозильной установки и в холодильной камере необходимо производить последовательно на каждом временном шаге с момента включения установки. По начальному значению  $T_{B4}$  вычисляем температуру  $T_{B6}$  выходящего из камеры воздуха. Затем по этому значению  $T_{B6}$  очередного временного шага, итерационными методами решаем 5 систему уравнений относительно  $T_{B2}, T_{B3}, T_{B4}, T_{B9}$  и  $T_{B10}$ . Далее производим переход на следующий временной шаг для определения  $T_{B6}$  и  $T_{B4}$ .

Варианты такого расчета представлены в подразделе 7.4.3.

#### 7.4.2. Определение толщины и материала теплоизолирующего слоя холодильной камеры

Для эффективной работы холодильной камеры необходимо, чтобы ее ограждение состояло из слоя, в котором герметичные внутренняя и наружная оболочки выполнены из некорродирующего материала, а пространство между ними заполнено веществом, не поглощающим или слабопоглощающим влагу и имеющим минимально возможную теплопроводность. При этом теплоизолирующий слой должен обладать свойством, при котором холодильная камера быстро переходит от нестационарного к стационарному режиму в процессе ее охлаждения с требуемым временем замораживания охлаждающих элементов, чего не требуется в бытовых холодильниках и других типах морозильных установок.

В подразделениях ГВГСС морозильные установки находятся в состоянии режима ожидания и размещаются в специальных боксах. За это время холодильные камеры обычно принимают температуру, близкую к температуре окружающей среды: от отрицательных до положительных в зависимости от времени года.

Нами сделано допущение, что этот процесс описывается уравнением теплопроводности плоского тела [23]

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i} \frac{d^2 T}{dx^2}, \quad (7.23)$$

где  $T$  – текущая температура, К;

$x$  – текущая координата, отсчитываемая от наружного слоя камеры по нормали к нему – внутрь камеры, м;

$\lambda_i, c_i, \rho_i$  – соответственно теплопроводность, Вт/(м·К); теплоемкость Дж/(кг·К); и плотность  $i$  – го слоя стенок, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\tau$  – время, с.  
 С учетом граничных и начальных условий:

$$x = 0; \quad T = T_0, \quad x = \delta_{\text{и}}; \quad T = T_x; \quad \tau = 0; \quad T = T_0; \quad (7.24)$$

где  $\delta_{\text{и}}$  – толщина слоя изоляции (стенок камеры), м;

$T_x$  – температура хладагента в камере, К;

Решение (7.23) для теплоизолирующего слоя стенок камеры примет вид

$$t = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_x} = \frac{x}{\delta_{\text{и}}} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \exp(-n^2 \pi^2 Fo) \cdot \sin \frac{n\pi x}{\delta_{\text{и}}}, \quad (7.25)$$

Определив из 7.25 градиент  $\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=\delta_{\text{и}}}$  и подставив его в формулу Фурье

$$q_k = -\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=\delta_{\text{и}}},$$

в результате получим выражение для стационарного удельного теплового потока при охлаждении плоского слоя

$$q_k = q_{k0} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\pi^2 n^2 F_0) \right], \quad (7.26)$$

где  $q_{k0} = (\lambda / \delta_{\text{и}})(T_0 - T_x)$  – стационарная составляющая теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

Если  $F_0 > 0,5$  процесс охлаждения холодильной камеры становится практически стационарным, при этом потери холода через слой изоляции стабилизируются.

По зависимостям (7.25), (7.26) можно определить температуру и тепловые потоки в любом сечении теплоизолирующего слоя камеры в различные промежутки времени.

Для камер воздушно-морозильных установок в процессе замораживания ОЭ-2 представляет практический интерес выбор толщины и определение потерь холода в период их охлаждения и выхода на стационарный режим при использовании в качестве изоляции материалов с малым влагопоглощением. Среди таких материалов могут быть применены выпускаемые отечественной промышленностью вспенивающийся полистирол ПСВ-1, пенопласт полистирольный плиточный ПС-4 - 40, пенополиэтилен ППЭ-3 и некоторые другие.

Определим тепловые потоки через стенки камеры в зависимости от времени охлаждения, температуры окружающей среды, температуры внутри камеры и толщины теплоизолирующего слоя. Принимаем, что стенки камеры состоят из трех слоев: наружного, прослойки (теплоизоляции) и внутреннего. Толщиной наружного и внутреннего слоев пренебрегаем (по сравнению с толщиной прослойки), а их теплопроводность значительно больше теплопроводности материала теплоизоляции.

Одним из применяемых теплоизоляционных материалов является пенополиэтилен ППЭ-3, выпускаемый в виде листов толщиной  $2 \cdot 10^{-2}$  м, имеющий плотность  $\rho = (60 \dots 87) \text{ кг/м}^3$ , температуропроводность  $a = (8,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ , теплопроводность  $\lambda = 4,652 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Также используется полистирол ПСВ-1 соответственно с  $\rho = 50 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda = 3,373 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;  $a = 3,223 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  и пенопласт ПС-4-40 имеющий свойства, близкие к ПСВ-1.

Значения нестационарного и стационарного удельных тепловых потоков через слой камеры при ее толщине 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 м определим из выражения (7.25), варьируя при этом температуру воздуха в камере (от минус 15 до минус 30 °С) и окружающей среды (от минус 20 до плюс 30 °С).

Предварительно оценим на примере с пенополиэтиленом долю термического сопротивления теплоотдачи от воздуха к внутреннему слою, если при скорости и температурах, имеющих место в камере, коэффициент теплоотдачи равен (70 ... 80) Вт/(м<sup>2</sup> · К). В этом случае термические сопротивления теплоотдачи воздуха и слоя изоляции соответственно (0,014 ... 0,012) и 0,43; 0,86; 1,29; 1,72 (м<sup>2</sup> · К) /Вт, то есть доля первого составляет (0,8 ... 3) %. Это позволяет считать приемлемым допущение о несущественном влиянии конвективного теплообмена на перенос теплоты через слой изоляции.

Для сопоставления времени выхода камеры на стационарный режим в

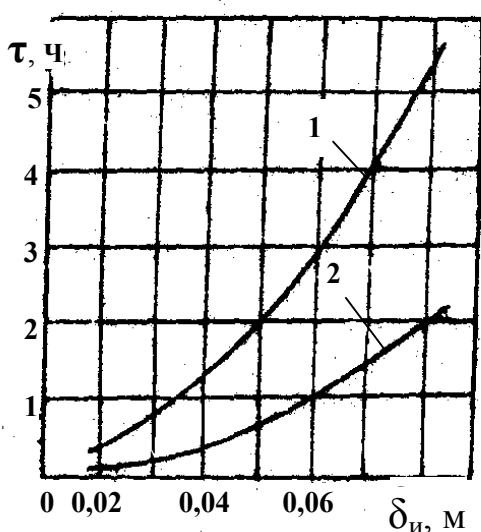


Рис. 7.11 – Время выхода камеры на стационарный режим работы в зависимости от толщины изоляции:  
1 – пенополиэтилен ППЭ-3;  
2 – полистирол ПСВ-1

процессе ее охлаждения при различной толщине слоя изоляции с требуемым временем замораживания ОЭ-2, равным (1,5...2,5) ч, выполнены расчеты для пенополиэтилена ППЭ-3 и полистирола ПСВ-1, результаты которых приведены на рис. 7.11. Критерием перехода от нестационарного к стационарному процессу переноса теплоты в первом приближении выбрано  $F_0 = 0,5$ . Результаты показывают,

что время выхода на стационарный режим при изоляции из полистирола более чем в два раза меньше, чем при аналогичной толщине изоляции из пенополиэтилена.

Результаты расчетов нестационарного и стационарного удельных тепловых потоков через слой камеры при различной толщине изоляции из полистирола и температурном перепаде воздуха в камере и окружающей среды, полученные с использованием уравнения (3.19), приведены на рис. 7.12. Отсюда следует, что удельный тепловой поток через одни и те же промежутки времени тем больше, чем больше перепад температур с обеих сторон и меньше толщина изоляции. С увеличением толщины изоляции от 0,02 до 0,08 м установившийся теплоприток в камеру убывает при максимальной разности температур  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  почти в 4 раза. Установившийся тепловой поток при разности  $(50 \dots 60)\text{ }^{\circ}\text{C}$ , толщине изоляции  $(0,06 \dots 0,08)\text{ м}$ ,  $\delta_{\text{и}} = 0,06\text{ м}$  равен  $(28,11 \dots 33,73)\text{ Вт/м}^2$ ; при  $\delta_{\text{и}} = 0,08\text{ м}$  –  $(21,08 \dots 25,3)\text{ Вт/м}^2$ .

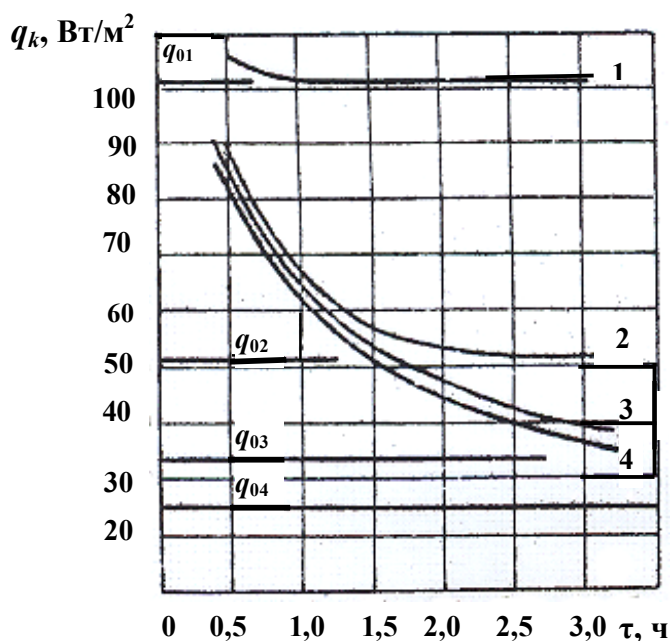


Рис. 7.12 – Зависимость удельного теплового потока через слой изоляции из полистирола ПСВ-1 от времени:

1,2,3,4 – толщина слоя 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 м;

$q_{01}$ ,  $q_{02}$ ,  $q_{03}$ ,  $q_{04}$  – стационарный тепловой поток через слои разной толщины

Допустимое значение теплопередачи через стенки низкотемпературных холодильных камер: до минус  $(50 \dots 70)\text{ }^{\circ}\text{C}$  равно не более  $(0,25 \dots 0,35)\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ . При этом, если принять максимальную температуру окружающей среды  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то удельный тепловой поток через  $1\text{ м}^2$  поверхности равен  $(28 \dots 35)\text{ Вт/м}^2$ . Для среднетемпературных холодильных камер (до минус  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), какими являются камеры воздушно-морозильных установок при тех же плотностях теплового потока, допустимое значение коэффициента теплопередачи равно  $(0,467 \dots 0,583)\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ .

Эти значения обеспечивает толщина изоляции из полиэтилена ППЭ-3 0,08; 0,09; 0,1 м при коэффициенте теплопередачи  $(0,581 \dots 0,465)\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ , а для изоляции из полистирола ПСВ-1 при той же толщине –  $(0,422 \dots 0,337)\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ .

На основании полученных результатов следует, что наиболее рациональной толщиной слоя изоляции камеры воздушно-морозильных установок



может быть принята 0,08 м, а в качестве материала следует использовать полистирол.

Результаты исследований использованы при проектировании холодильных камер воздушно-морозильных установок.

#### 7.4.3. Моделирование процесса замораживания водолеяных охлаждающих элементов в камерах воздушных установок

Для определения температуры на выходе из холодильной камеры (точка 5, см. рис. 7.10), а также основной технической характеристики установок – времени замораживания требуемого количества ОЭ-2, перейдем к моделированию нестационарных теплообменных процессов между поступающим в камеру низкотемпературным воздушным потоком и водой ОЭ-2.

Рассмотрим наиболее обобщенную схему камеры наземной установки (рис. 7.13), где  $x$  – пространственная координата, отсчитываемая по воздушному потоку от его входа в камеру, м;  $y$  – пространственная координата, отсчитываемая от боковой поверхности ОЭ-2 вглубь его среды по нормали, м;  $u$  – скорость воздушного потока, м/с;  $T_{\text{вх}}$  и  $T_{\text{вых}}$  – температуры воздушного потока на входе и выходе из камеры, К;  $T_0 = T_c$  – температура окружающей среды, К [26]....

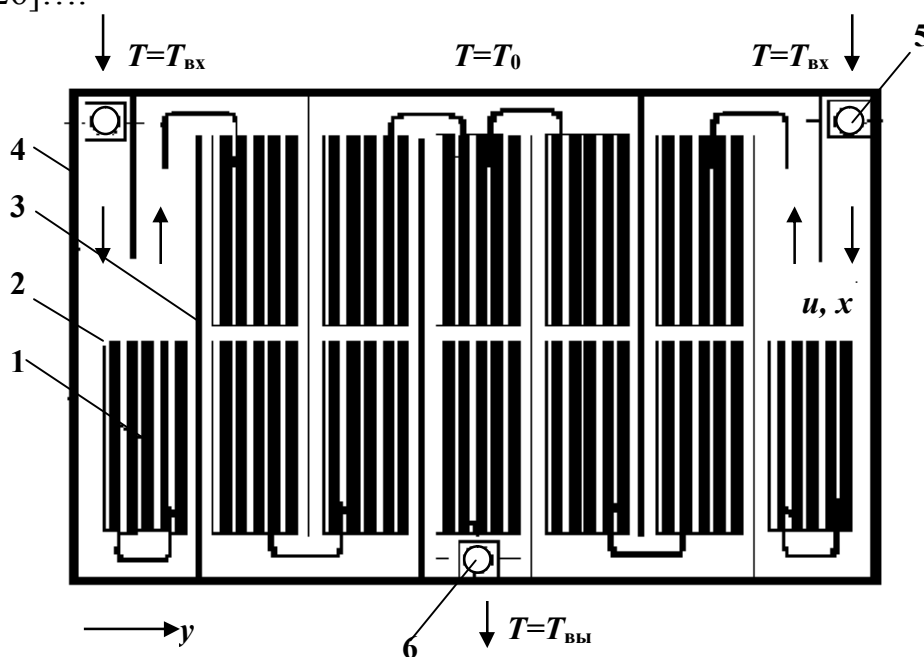


Рис. 7.13 – Схема холодильной камеры:

- 1 – охлаждающий элемент; 2 – контейнер;
- 3 – перегородка; 4 – теплоизолирующий корпус;
- 5 – патрубок входа воздуха в камеру;
- 6 – патрубок выхода воздуха из камеры

До поступления в камеру установки низкотемпературной воздушной среды температура ОЭ-2 принята равной  $T_0$ . Поток поступает в камеру при температуре  $T_{\text{вх}}$ , омывает ОЭ-2 и нагревается за счёт конвективно-

диффузионного теплообмена со средой ОЭ-2 (водой или льдом) до температуры  $T_{\text{вых}}$ .

Этот процесс моделировали системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial \tau} + u \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial x} = \alpha_{\Gamma} (T_{\text{оэ}} - T_{\Gamma}); \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (7.27)$$

с начальными условиями

$$T_{\Gamma}(x, 0) = T_0, \quad T(x, y, 0) = T_0 \quad (7.28)$$

и граничными условиями

$$T_{\Gamma}(0, \tau) = T_{\text{вх}}; \quad -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_k (T_{\Gamma} - T_{\text{оэ}} 0); \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta_{\text{оэ}}/2} = 0, \quad (7.29)$$

где  $T_{\Gamma} = T_{\Gamma}(x, \tau)$  – температура воздуха, К;

$\tau$  – время с момента поступления воздуха в камеру, с;

$\alpha_{\Gamma} = \alpha_k / (\rho_{\Gamma} c_{\Gamma} \Delta)$  – относительная величина коэффициента конвективного теплообмена между воздухом и средой ОЭ-2, 1/с;

$\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена между воздухом и средой ОЭ-2, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\rho_{\Gamma}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$c_{\Gamma}$  – теплоёмкость воздуха, Дж/(кг · К);

$\Delta$  – расстояние между ОЭ-2, м;

$\delta_{\text{оэ}}$  – толщина ОЭ-2 по  $y$ , м;

$T_{\text{оэ}}$  – температура поверхности ОЭ-2, в общем случае зависящая от пространственной координаты и времени, К;

$T = T(x, y, \tau)$  – температура среды ОЭ-2, К;

$\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности среды ОЭ-2, Вт/(м · К).

По мере продвижения воздуха в течение некоторого периода времени  $\tau_3$ , с, в отдельной ампуле ОЭ-2 образуется замерзающий слой воды переменной толщины  $\xi_{\Gamma}(\tau)$ , м, отсчитываемой по  $y$  ( $0 \leq \xi_{\Gamma} \leq \delta_{\text{оэ}}/2$ ). Внутренняя граница слоя, называемая фронтом промерзания, имеет температуру фазового перехода  $T_{\text{ф}}$ , К, при которой вода превращается в лед. Через фронт промерзания отводится теплота фазового перехода  $\theta$ , Дж/кг.

Принимаем, что перенос теплоты в среде ампулы происходит только за счёт теплопроводности, поэтому процесс перехода воды в лед при фиксирован-

ном  $x = x_0$ , моделировался следующими уравнениями (индекс «л» обозначает температуру и теплофизические параметры льда, индекс «ж» – жидкости):

$$\frac{\partial T_{\text{л}}(\xi_{\text{т}}, \tau)}{\partial \tau} = a_{\text{л}} \frac{\partial^2 T_{\text{л}}(\xi_{\text{т}}, \tau)}{\partial \xi_{\text{т}}^2}; \quad (7.30)$$

$$\frac{\partial T_{\text{ж}}(\xi_{\text{т}}, \tau)}{\partial \tau} = a_{\text{ж}} \frac{\partial^2 T_{\text{ж}}(\xi_{\text{т}}, \tau)}{\partial \xi_{\text{т}}^2}; \quad (7.31)$$

с краевыми условиями

$$T_{\text{ж}}(\xi_{\text{т}}, 0) = T_0, T_{\text{л}}(0, \tau) = T_{\text{оэ}}(x_1, \tau), T_{\text{ж}}(\xi_{\text{т}}, \tau) = T_{\text{л}}(\xi_{\text{т}}, \tau) = T_{\text{ф}}, \quad (7.32)$$

$$\lambda_{\text{л}} \frac{\partial T_{\text{л}}(\xi_{\text{т}}, \tau)}{\partial x} - \lambda_{\text{ж}} \frac{\partial T_{\text{ж}}(\xi_{\text{т}}, \tau)}{\partial x} = \theta \rho_{\text{ж}} \frac{\partial \xi_{\text{т}}}{\partial \tau}, \quad (7.33)$$

где  $\lambda_{\text{л}}, \lambda_{\text{ж}}$  – коэффициенты теплопроводности льда и воды, Вт/(м·К);  
 $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Частные решения дифференциальных уравнений (7.30) и (7.31), при неизменной температуре  $T_{\text{оэ}}$ , получены методом функций источника

$$\begin{aligned} T_{\text{л}} &= A_1 - B_1 \psi\left(\frac{\xi_{\text{т}}}{2\sqrt{a_{\text{л}}\tau}}\right); \\ T_{\text{ж}} &= A_2 - B_2 \psi\left(\frac{\xi_{\text{т}}}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}}\right), \end{aligned} \quad (7.34)$$

где  $A_1, A_2, B_1, B_2$  – постоянные, определяемые из граничных условий задачи;

$\psi(\xi_{\text{т}}, a, \tau)$  – интеграл ошибок Гаусса.

Так как при  $\xi_{\text{т}} = 0 : \psi\left(\frac{\xi_{\text{т}}}{2\sqrt{a_{\text{л}}\tau}}\right) = 0$ , то  $A_1 = T_{\text{л}}(0) = T_{\text{оэ}}$ . При  $\frac{\xi_{\text{т}}}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}} \rightarrow \infty$

$\psi\left(\frac{\xi_{\text{т}}}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}}\right) \rightarrow 1$ , следовательно  $A_2 - B_2 = T_{\text{ж}}(0) = T_0$ .

В связи с этим, частные решения системы (7.30) и (7.31) примут вид

$$T_{\text{л}}(\xi_{\text{т}}, \tau) = T_{\text{оэ}} - B_1 \psi\left(\frac{\xi_{\text{т}}}{2\sqrt{a_{\text{л}}\tau}}\right); \quad (7.35)$$

$$T_{\text{ж}}(\xi_{\text{т}}, \tau) = T_0 + B_2 \psi \left[ 1 - \psi \left( \frac{\xi_{\text{т}}}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}} \right) \right].$$

В соответствии с (7.32) температура льда и воды на фронте замерзания ОЭ-2 должна быть одинаковой, поэтому

$$T_{\text{оэ}} - B_1 \psi \left( \frac{\xi_{\text{т}}}{2\sqrt{a_{\text{л}}\tau}} \right) = T_0 + B_2 \psi \left[ 1 - \psi \left( \frac{\xi_{\text{т}}}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}} \right) \right] = T_{\text{ф}}. \quad (7.36)$$

Соотношение (7.36) должно выполняться в любой момент времени  $\tau$ , а  $B_1$  и  $B_2$  – постоянные величины, поэтому функции  $\psi$  не должны изменяться во времени. А это возможно лишь при условии  $\xi_{\text{т}} \approx \sqrt{\tau}$ . Принимая  $\xi_{\text{т}} = \chi\sqrt{\tau}$ , где  $\chi$  – произвольная константа пропорциональности, получим следующие зависимости

$$B_1 = \frac{T_{\text{оэ}} - T_{\text{ф}}}{\psi \left( \frac{\chi}{2\sqrt{a_{\text{л}}}} \right)}, \quad B_2 = \frac{T_{\text{ф}} - T_0}{1 - \psi \left( \frac{\chi}{2\sqrt{a_{\text{ж}}}} \right)}. \quad (7.37)$$

В результате дифференцирования выражений (7.35) с учетом (7.37) получено уравнение для определения  $\chi$ , а, следовательно, и  $\xi = \chi\sqrt{\tau} \dots$

$$\frac{1}{2} \theta \rho_{\text{ж}} \chi = \frac{\lambda_{\text{ж}}}{\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}} (T_{\text{оэ}} - T_{\text{ф}}) \frac{e^{-\frac{\chi^2}{4a_{\text{ж}}}}}{\psi \left( \frac{\chi}{2\sqrt{a_{\text{ж}}}} \right)} + \frac{\lambda_{\text{л}}}{\sqrt{\pi a_{\text{л}}}} (T_{\text{ф}} - T_0) \frac{e^{-\frac{\chi^2}{4a_{\text{ж}}}}}{1 - \psi \left( \frac{\chi}{2\sqrt{a_{\text{л}}}} \right)}. \quad (7.38)$$

Глубину фронта промерзания  $\xi_{\text{т}}$  и длительность периода замерзания можно также определить из уравнения баланса теплоты фазового перехода и ее отвода от фронта оледенения ...

$$\rho_{\text{ж}} \theta \frac{d\xi_{\text{т}}}{d\tau} = \lambda_{\text{л}} \frac{T_{\text{ф}} - T_{\text{оэ}}}{\xi_{\text{т}}}. \quad (7.39)$$

После интегрирования уравнения по времени (7.39) при условии  $\xi_{\text{т}}(0) = 0$ , получили выражение для глубины фронта промерзания  $\xi_{\text{т}}$

$$\xi_{\text{т}} = \sqrt{\frac{2\lambda_{\text{л}}}{\rho_{\text{ж}}\theta} (T_{\text{ф}} - T_{\text{оэ}}) \tau}. \quad (7.40)$$

Это приближенное решение, как и точное, пропорционально  $\sqrt{\tau}$ , при этом длительность замерзания воды в ОЭ-2  $\tau_3$ , с, равна

$$\tau_3 = \frac{\delta_a^2}{2\lambda_{\text{л}}} \frac{\rho_{\text{ж}}\theta}{(T_{\text{ф}} - T_{\text{оэ}})}, \quad (7.4)$$

где  $\delta_a$  – толщина ампулы ОЭ-2, м

Результаты исследований процесса замораживания отдельного ОЭ-2 использовали при решении основной задачи (7.27)–(7.29) теплообмена между низкотемпературным газовым потоком и ОЭ-2 в камере морозильных установок.

Проведем осреднение температуры каждого ОЭ-2 по толщине, в результате чего уравнение (7.27) и краевые условия (7.28), (7.29) преобразовывали к следующему виду

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial \tau} + u \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial x} = \alpha_{\Gamma} (T_{\text{оэ}} - T_{\Gamma}) \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \tau^2} + \frac{2}{\delta_{\text{оэ}}} \frac{\alpha_{\text{к}}}{\lambda_{\text{с}}} (T_{\text{оэ}} - \bar{T}) \right]; \end{cases} \quad (7.41)$$

$$T_{\Gamma}(x, 0) = T_0, \quad \bar{T}(x, 0) = T_0; \quad (7.42)$$

$$T_{\Gamma}(0, \tau) = T_{\text{вх}}; \quad T_{\text{оэ}} = \frac{\bar{T} + \bar{\alpha}_{\text{к}} T_{\Gamma}}{1 + \bar{\alpha}_{\text{к}}}, \quad (7.43)$$

где  $\bar{T} = \frac{2}{\delta_{\text{оэ}}} \int_0^{\delta_{\text{оэ}}/2} T dy$  – средняя по толщине ОЭ-2 температура, К;

$\bar{\alpha}_{\text{к}} = \frac{\delta_{\text{оэ}}}{2} \frac{\alpha_{\text{к}}}{\lambda_{\text{с}}}$  – относительная величина коэффициента конвективного

теплообмена между воздушным потоком и ОЭ-2.

Решение представленной системы уравнений с краевыми условиями производили численным методом. Значения температуры заменяли ее значениями в узлах сетки, построенной по пространственной координате  $x$  с шагом  $\Delta x$ , м, и по временной координате  $\tau$  с шагом  $\Delta \tau$ , с. Шаги алгоритма расчета:

$$t_{1,i}^{n+1} = \bar{a} \cdot t_{1,i-1}^n + (1 - 2\bar{a} - \bar{a}_{\alpha}) t_{1,i}^n + \bar{a} \cdot t_{1,i+1}^n + \bar{a}_{\alpha} \cdot t_{3,i}^n; \quad (7.44)$$

$$t_{2,i}^{n+1} = (1 - \bar{u} - \bar{\alpha}_{\Gamma}) t_{2,i}^n + \bar{u} t_{2,i-1}^n + \bar{\alpha}_{\Gamma} t_{3,i}^n; \quad t_{3,i}^{n+1} = \frac{t_{1,i}^n + \bar{\alpha}_{\text{к}} t_{2,i}^n}{1 + \bar{\alpha}_{\text{к}}},$$

где индекс «1» указывает на параметры среды ОЭ-2, «2» – хладоносителя (воздуха); «3» – поверхности ОЭ-2;

$$t = \frac{T - T_0}{T_{\text{вх}} - T_0} - \text{безразмерная величина температуры;}$$

$\bar{a} = a \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2}$  – безразмерный комплекс, характеризующий температуропроводность ОЭ-2;

$\bar{\alpha}_a = \frac{2}{\delta_{\text{оо}}} a \frac{\alpha_{\text{к}}}{\lambda_{\text{с}}}$  – безразмерный комплекс, характеризующий теплопроводность, теплоотдачу и теплопроводность ОЭ-2;

$\bar{\alpha}_{\text{г}} = \alpha_{\text{г}} \cdot \Delta\tau$  – безразмерный комплекс, характеризующий теплообмен между потоком воздуха и ОЭ-2.

Принимаем, что замораживание воды в ОЭ-2 начинается после её охлаждения до температуры замерзания. По температуре поверхности ОЭ-2 на каждом временном шаге вычисляли глубину фронта промерзания в соответствии с (3.35). Моментом завершения замораживания считали временной шаг, на котором глубина промерзания достигает половины толщины ампулы. По окончании периода замораживания теплопроводность и температуропроводность воды приравнивали к соответствующим параметрам льда.

Разработан алгоритм и составлена программа расчета динамики температуры и гидравлических параметров составных частей воздушно-морозильных установок с турбохолодильниками. Варианты расчетов температуры воздуха: на входе в теплообменник предохлаждения II; после рекуперативного теплообменника III; после турбохолодильника IV (см. рис. 7.10), а также воздушного потока в зависимости от длины пути движения и температуры ОЭ-2 при их замораживании, приведены на рис. 7.14-7.16.

Анализ полученных результатов показывает, что: с повышением температуры входящего в установку сжатого воздуха от 50 до 62 °С, в условиях воздушного охлаждения теплообменника II, температура после рекуперативного теплообменника III возрастает, а при водяном охлаждении – практически не меняется, причем температура поступающего воздуха в камеру во втором случае в среднем в 1,6 раза ниже, чем в первом, а устойчивая максимальная отрицательная температура в ней достигается при температуре входящего в установку сжатого воздуха около 60 °С и ниже (см. рис. 7.14); температура воздушного потока при фиксированном времени замораживания ОЭ-2 с увеличением длины пути движения по каналам камеры повышается, а по времени – стремится к температуре воздуха, входящего в камеру из турбохолодильника, причем время достижения соответствующей температуры во втором случае (водой – штриховые линии) примерно в 1,6 раза ниже, чем в первом (см. рис. 7.15); время замораживания ОЭ-2 до необходимой температуры минус 10 °С при температуре входящего в установку воздуха 60 °С, в камеру минус 20 °С и окружающей среды – плюс 20 °С равно 90 мин (см. обозначение 5 для последнего ОЭ-2 на выходе из камеры рис. 7.16), при

температуре  $0^{\circ}\text{C}$  происходит фазовый переход (воды в лед – горизонтальные линии), а время замораживания во втором случае также примерно в 1,6 раза меньше, чем в первом; температура воздушного потока при фиксированном времени замораживания ОЭ-2 с увеличением длины пути движения по каналам камеры повышается, а по времени – стремится к температуре воздуха, входящего в камеру из турбохолодильника, причем время достижения соответствующей температуры во втором случае (водой – штриховые линии) примерно в 1,6 раза ниже, чем в первом (см. рис. 7.15); время замораживания ОЭ-2 до необходимой температуры минус  $10^{\circ}\text{C}$  при температуре входящего в установку воздуха  $60^{\circ}\text{C}$ , в камеру минус  $20^{\circ}\text{C}$  и окружающей среды – плюс  $20^{\circ}\text{C}$  равно 90 мин (см. обозначение 5 для последнего ОЭ-2 на выходе из камеры рис. 7.16), при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  происходит фазовый переход (воды в лед – горизонтальные линии), а время замораживания во втором случае также примерно в 1,6 раза меньше, чем в первом;

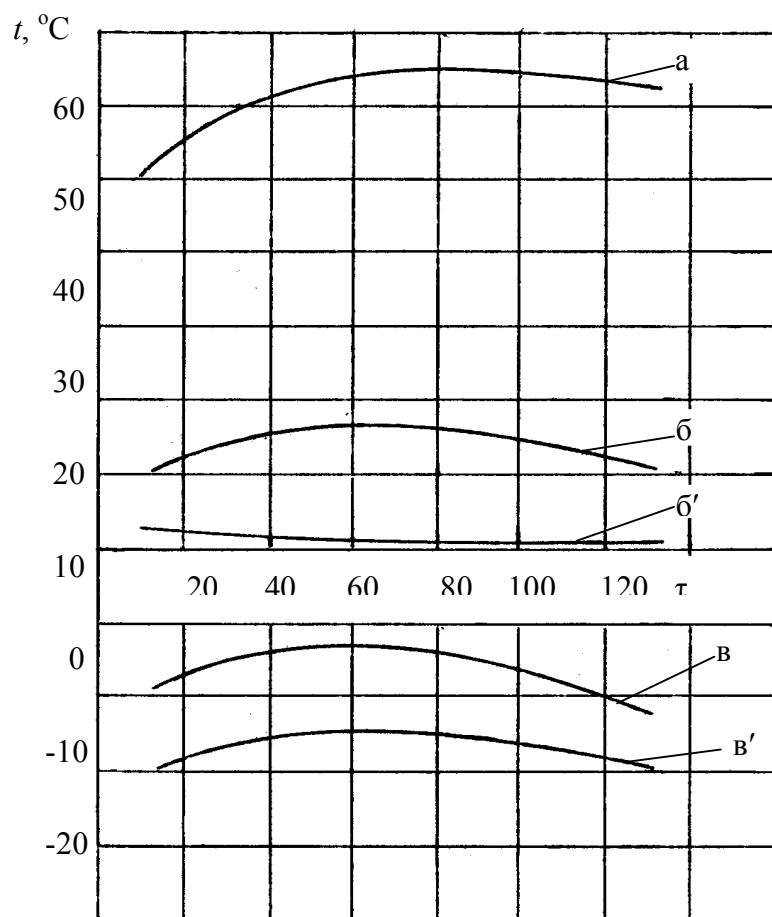


Рис. 7.14 – Зависимость температуры воздуха в некоторых точках составных частей морозильной установки от времени:

а – в точке 1 (см. рис. 7.10); б, б' – в точке 3 соответственно с воздушным и водяным предохлаждением;  
в, в' – в точке 4 с воздушным и водяным предохлаждением

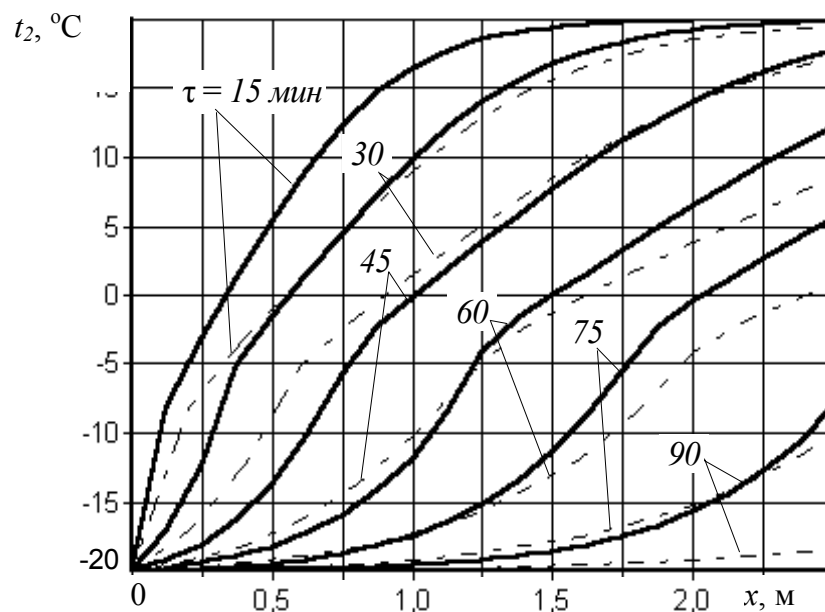


Рис. 7.15. Динамика температуры воздушного потока в зависимости от длины движения в холодильных камерах при  $t_0 = 20\text{ °C}$  и  $t_{\text{вх}} = -20\text{ °C}$ : сплошные линии – воздушное, штриховые – водяное предохлаждение теплообменников

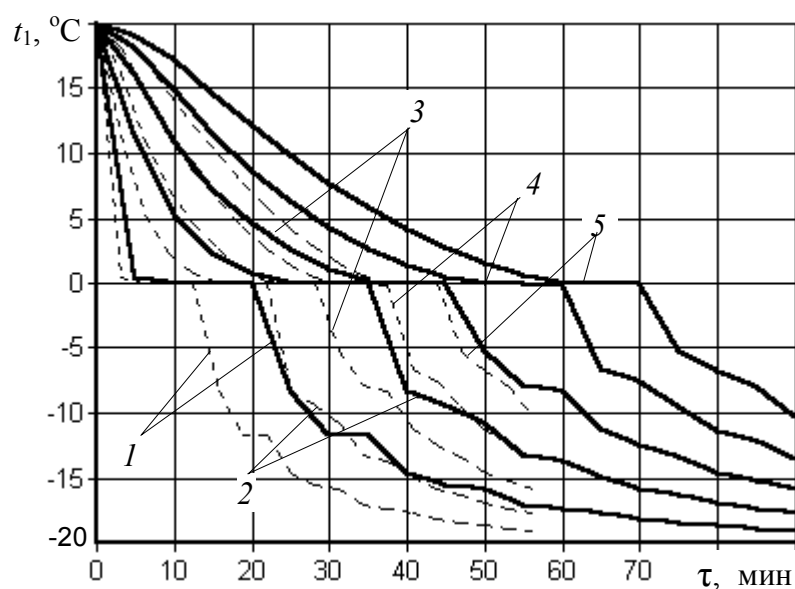


Рис. 7.16 – Динамика температуры ОЭ-2 при  $t_0 = 20\text{ °C}$  и  $t_{\text{вх}} = -20\text{ °C}$ : сплошные линии – воздушное, штриховые – водяное предохлаждение теплообменника наземной установки; 1,5 – номера ОЭ-2 первого (на входе) и последнего (на выходе) контейнеров; 2, 3, 4 – номера промежуточных контейнеров



для получения минимальной положительной температуры воздуха перед турбохолодильником IV необходимо, чтобы его температура на входе в установку (точка 1, см. рис. 7.10) не превышала 60 °С, температура воды 20-22 °С, расход воды или воздуха на охлаждение теплообменников наземной установки равнялся 0,16 м<sup>3</sup>/мин и 7 м<sup>3</sup>/мин, для шахтной соответственно – 0,11 м<sup>3</sup>/мин и 14 м<sup>3</sup>/мин, а для каждого теплообменника площадь трубной полости должна быть около 2,5 м<sup>2</sup>, межтрубной – 25 м<sup>2</sup>.

Таким образом, система уравнений и краевых условий (3.20-3.26) представляют математическую модель процесса тепломассообмена и замораживания ОЭ-2 в камере установки с использованием воздуха в качестве хладоносителя. Использование результатов исследований, приведенных в подразделе 3.2, позволяет выбирать оптимальную конструкцию холодильных камер и массу ОЭ-2 в зависимости от температуры и скорости поступающего в камеру воздуха и температуры окружающей среды и, в конечном счете, определить производительность технических средств по замораживанию ОЭ-2 на поверхности и в горных выработках шахт с использованием турбохолодильников.

#### 7.4.4 Определение параметров вихревых труб переносной шахтной морозильной установки

Как отмечено выше, применение вихревых труб связано, в основном с кондиционированием и получением холода в сравнительно малых объемах с тщательной очисткой воздуха и применением теплообменников. Такие установки являются громоздкими, имеют большую массу, а исследования о возможности применения их в установках для замораживания ОЭ-2 не проводились. В данном случае, установка должна быть переносной, массой не более 40 кг и обеспечить замораживание ОЭ-2 в течение одного цикла не менее, чем шахтная установка с турбодетандерным получением холода.

Производительность морозильной установки с вихревыми трубками должна быть такой, чтобы ее параметры обеспечили расход и температуру воздуха, поступающего в холодильную камеру, аналогичные шахтной передвижной установки с турбохолодильниками.

Для определения параметров вихревых труб, обеспечивающих требуемую производительность установки, рассмотрим процессы получения холода с использованием вихревого эффекта.

Основные параметры вихревой трубы определим, используя ранее полученные выражения, а также на основании полученных зависимостей, разработанного алгоритма и программы решения задачи.

Процесс получения холода в вихревой трубе характеризуется расходом  $G$ , м<sup>3</sup>/с, и давлением  $P_1$ , МПа, сжатого воздуха, расходом  $G_x$ , м<sup>3</sup>/с, и давлением  $P_x$ , МПа, холодного воздуха, поступающего в морозильную камеру установки, а также перепадом температур,  $\Delta t_x$ , К[25]

$$\Delta t_x = T_1 - T_x, \quad (7.45)$$

где  $T_1, T_x$  – температуры сжатого и холодного воздуха, К.

При расчетах и анализе теплообменных и гидравлических процессов используют относительные величины: степень расширения  $\pi_1$ , долю холодного воздуха  $\mu_1$  и температурную эффективность  $\eta_t$

$$\pi_1 = \frac{P_1}{P_x} = \left(1 - \frac{\Delta t_x}{\eta_t T_1}\right)^{-\frac{m_a}{m_a - 1}}, \quad \mu_1 = \frac{G_x}{G}, \quad \eta_t = \Delta t_x / T_1 \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_1}\right)^{\frac{m_a - 1}{m_a}}\right]. \quad (7.46)$$

Доля холодного воздуха  $\mu_1$  зависит от перепада температур  $\Delta t_x$  и параметров сжатого воздуха, а следовательно, температурной эффективности  $\eta_t$ .

С другой стороны, на перепад температур существенное влияние оказывает влажность сжатого воздуха. Обычно при давлении свыше 0,2 МПа считают, что воздух имеет относительную влажность  $B = 100 \%$ . Тогда влияние влажности учитывают с помощью поправки

$$\delta(\Delta t_x) = 18B \frac{P_{s1}}{P_1}, \quad (7.47)$$

где  $P_{s1}$  – давление насыщенного водяного пара в воздухе при температуре  $T_1$ , МПа, определяется по таблицам.

Для упрощения расчетов полученные ранее табличные данные нами аппроксимированы в рабочем диапазоне температур сжатого воздуха с погрешностью, не превышающей 2 %, следующей зависимостью:

$$P_{s1} = 5,96 \cdot 10^{-3} + 6,33 \cdot 10^{-4} T_2 - 2,43 \cdot 10^{-6} T_2^2 + 7,52 \cdot 10^{-7} T_2^3, \quad T_2 = T_1 - 273. \quad (7.48)$$

С учетом влияния влажности воздуха скорректированный перепад температур имеет вид:

$$\Delta t_x = (\Delta t_x)_B + \delta(\Delta t_x). \quad (7.49)$$

В качестве исходных данных при расчете параметров морозильной установки с использованием вихревого эффекта используем также следующие параметры: холодопроизводительность  $W_2$ , кВт, перепад температуры воздуха при прохождении его через морозильную камеру  $\Delta t_x$ , К, удельную теплоемкость воздуха  $c_p$ , кДж/(кг·К).

Необходимый расход холодного воздуха рассчитываем по формуле:

$$G_x = \frac{W_2}{c_p \Delta t_x}. \quad (7.50)$$

в которой с учетом  $\Delta t_x$ , задаемся величиной  $T_x$ , определяем поправки  $\delta(\Delta t_x)$  по зависимости (7.47) и требуемый перепад температур по формуле (7.45).

По значению давления сжатого и холодного воздуха, используя зависимость (7.46), определяем значение  $\pi_1$ , а по значениям  $\Delta t_x$  и  $\pi_1$ , затем  $-\eta_t$ . Зная значения  $\eta_t$  и  $\pi_1$ , вычисляем  $\mu_1$ . Для этого используем ранее полученные графические зависимости, а используя значения  $\mu_1$  и  $c_p$ , определим расход сжатого воздуха  $G_b$ , площадь поперечного сечения сопла  $F_c$ ,  $m^2$ , высоту  $h_c$ , м, и ширину  $B_c$ , м, отверстия сопла, а также внутренний диаметр  $D_T$ , м, (диаметр вихревой зоны) цилиндрической трубы, то есть

$$G_b = \frac{G_x}{\mu_1}, F_c = \frac{G_b \sqrt{T_1}}{0,38 P_1} 100, h_c = \sqrt{F_c / 2}, B_c = \frac{F_c}{h_c}, D_T = 3,65 \sqrt{F_c}. \quad (7.51)$$

После этого производим корректировку  $h_c$  с учетом влияния масштаба

$$\Delta \eta = 0,5 \cdot 10^{-2} (D_T - 33). \quad (7.52)$$

При этом вычисляем поправку к  $h_c$  и ее откорректированное значение

$$h_c = \eta_t + \Delta \eta_t. \quad (7.53)$$

Далее уточняем значение  $\mu_1$  и производим повторный расчет по зависимостям (7.51) значений  $G_b, F_c, h_c, B_c, D_T$ . Расчет проводим методом последовательных приближений до тех пор, пока не будет соблюдаться условие:  $\Delta \mu_1 \leq 0,01$ .

По полученным данным определяем диаметр отверстия диафрагмы  $D_g$ , м, длину рабочей зоны вихревой трубы  $L_T$ , м, температуру рабочего воздуха  $T_T$ , К, и давление нагретого воздуха перед дросселем  $P_T$ , МПа:

$$D_g = (0,350 + 0,313 \mu_1) D_T; \quad L_T = 9 D_T; \\ T_T = T_1 + \frac{\Delta t_x \mu_1}{1 - \mu_1}; \quad P_T = P_x (0,33 \pi_1 + 0,67). \quad (7.54)$$

С учетом принятых исходных данных:  $W_2 = 0,15$  кВт;  $P_1 = 0,5$  МПа;  $T_1 = 298$  К;  $\Delta t = 10$  К;  $B = 100$  %;  $T_x = 253$  К, с помощью вышеприведенных зависимостей проведен расчет и получены следующие параметры для вихревых труб морозильной установки:  $F_c = 0,052$  м;  $h_c = 0,0051$  м;  $B_c = 0,0102$  м;

$D_T = 0,0264$  м;  $D_g = 0,0114$  м;  $L_T = 0,237$  м;  $G_B = 0,05$  м<sup>3</sup>/с;  $G_x = 0,0125$  м<sup>3</sup>/с;  
 $T_r = 317,9$  К;  $\eta_t = 0,49$ ;  $\mu_1 = 0,26$ .

Анализ расхода холодного воздуха  $G_x$  показывает, что для того, чтобы обеспечить производительность, аналогичную передвижной шахтной установке с турбохолодильниками, необходимо в переносной установке использовать двенадцать вихревых труб. Однако, учитывая ограничения по габаритным размерам и массе, в переносной установке в дальнейшем использовано восемь вихревых труб, которые обеспечивают замораживание не менее 100 ОЭ-2 в час.

Полученные результаты использованы при проектировании и изготовлении переносной шахтной воздушно-морозильной установки.

#### 7.4.5. Температурный режим и гидравлические параметры пневмотрубопроводов установок

Воздушные морозильные установки могут быть подсоединены к пневмосети или к компрессорам сжатого воздуха на поверхности или в горных выработках шахт с помощью гибких трубопроводов.

Для обеспечения минимальной положительной температуры воздуха перед турбохолодильником холодильной камеры, с целью достижения в ней отрицательной температуры, необходимо, чтобы температура воздуха на входе в установку не превышала 60 °С (см. подраздел 3.3) при давлении 0,45-0,5 МПа и расходе от 7 до 25 м<sup>3</sup>/мин.

За счет теплообмена с окружающей средой температура внутри трубопровода снижается по мере удаления от входного сечения. Кроме того, температурный режим в трубопроводе зависит от аэродинамических и теплофизических параметров.

Замораживание ОЭ-2 может быть обеспечено только при определенных конструктивных параметрах трубопровода, удовлетворяющих вышеуказанным требованиям по температуре подаваемого в установку воздуха.

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений, моделирующих тепломассоперенос в трубопроводе передвижной шахтной установки и в окружающей трубопровод среде горной выработки, следующего вида [27]:

$$\left. \begin{aligned} \rho_B c_B u_T T'_T &= \frac{k_T \Omega_T}{S_T} (T_B - T_T) \\ \rho_B c_B u_0 T'_0 &= \frac{\alpha_n \Omega_B}{S} (T_n - T_B) - \frac{\bar{\alpha}_T \Omega_T}{S_T} (T_B - T_T) \end{aligned} \right\}, \quad (7.55)$$

где  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$c_B$  – теплоемкость воздуха, Дж/(кг · К);

$u_T, u_0$  – скорость воздушных потоков в трубопроводе и окружающей среде, м/с;

$T_T$  – температура воздуха в трубопроводе, К;

$T_n$  – температура пород в месте расположения трубопровода (принята известной константой), К;

$k_T$  – коэффициент теплопередачи оболочки трубопровода, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\Omega_T, \Omega_B$  – периметр сечения трубопровода и выработки, м;

$S_T$  – площадь сечения трубопровода, м<sup>2</sup>;

$\hat{\alpha}$  – коэффициент теплообмена между оболочкой трубопровода и воздушным потоком в выработке, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\alpha_n$  – коэффициент теплообмена между воздушным потоком в выработке и породами, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

В системе уравнений (7.55) верхний индекс “’” (штрих) означает производную от температуры по пространственной координате  $x$ , м, отсчитываемой от начального сечения трубопровода по направлению потока воздуха в нём. При противонаправленном движении воздушных потоков скорость потока в окружающей среде (выработке) имеет отрицательное значение, а для наземной установки можно принимать  $u_B = 0$ . Кроме того, для наземной установки температура окружающей среды считается известной константой и задача сводится к решению только первого уравнения системы (7.55).

Система уравнений (3.49) дополняется граничными условиями

$$T_T(0) = T_T^0; \quad T_0(0) = T_0^0, \quad (7.56)$$

при которых температура воздушных потоков в начальном сечении трубопровода, является известной величиной.

Введем безразмерные переменные

$$\xi_p = x/R_T; \quad t = T/T_n, \quad (7.57)$$

где  $R_T$  – радиус трубопровода, м.

Тогда система уравнений (7.55) и граничные условия (7.56) преобразуются к следующему виду (штрихи обозначают краткие производные):

$$\left. \begin{aligned} t'_T &= 2a_1(t_B - t_T) \\ t'_B &= 2a_1m[(1 - t_B) - \bar{m}(t_B - t_T)] \end{aligned} \right\}, \quad (7.58)$$

$$t_T(0) = t_T^0; \quad t_B(0) = t_B^0, \quad (7.59)$$

где  $a_1 = \frac{k_T}{\rho_B c_B u_T}$  – безразмерный комплекс, характеризующий интенсивность теплообмена между воздушным потоком в трубопроводе и окружающей средой;

$k_T = \left( \frac{1}{\hat{\alpha}_T} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{1}{\check{\alpha}_T} \right)^{-1}$  – коэффициент теплопередачи оболочки трубопровода, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  
 $\delta_T$  – толщина оболочки трубопровода, м;  
 $\check{\alpha}_T$  – коэффициент конвективного теплообмена между воздушным потоком в трубопроводе и его оболочкой, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

В систему уравнений (3.52) входят масштабные множители

$$m_T = \frac{m_R}{m_k m_u}; m_R = \frac{R_T}{R_B}; m_k = \frac{k_T}{\alpha_{\Pi}}; m_u = \frac{u_B}{u_T}; \bar{m} = m_R m_a; m_a = \frac{\hat{\alpha}_T}{\alpha_{\Pi}}. \quad (7.60)$$

Здесь  $R_B$  – гидравлический радиус воздушного потока окружающей среды выработки, м.

Принято, что отношение периметров потоков к площади поперечных сечений обратно пропорционально их гидравлическим радиусам (для эквивалентного круглого сечения), т.е.  $\Omega/S_T = 2/R_T$ , а коэффициенты конвективного теплообмена рассчитываются по формуле вида

$$\alpha_T = 1,635 \cdot \varepsilon_T \cdot \frac{u^{0,8}}{R_T},$$

где  $\varepsilon_T$  – шероховатость стенок выработки или поверхности трубопровода.  
 Из первого уравнения системы (7.58) следует

$$t_B = \frac{1}{2a_1} t'_T + t_T; \quad t_B - t_T = \frac{1}{2a_1} t'_T, \quad (7.61)$$

а после подстановки (7.61) во второе уравнение системы (7.58) получим дифференциальное уравнение второго порядка относительно температуры внутри трубопровода

$$t''_T + 2\mu_T a_1 t'_T + 4m_T a_1^2 t_T = 4m_T a_1^2 \quad (7.62)$$

с граничными условиями

$$t'_T(0) = \frac{1}{2a_1}(t_B^0 - t_T^0); \quad t_T(0) = t_T^0, \quad (7.63)$$

где  $\mu_T = 1 + (1 + \bar{m})m_T$ .

Решение уравнений (7.62) и (7.63) получено в виде

$$t_T = 1 + C_1^* e^{\lambda_1^* \xi_T} - C_2^* e^{\lambda_2^* \xi_T}, \quad (7.64)$$

где

$$C_1^* = \frac{\lambda_2^* t_T^0 - 2a_1(t_B^0 - t_T^0)}{\lambda_2^* - \lambda_1^*}; \quad C_2^* = \frac{\lambda_1^* t_T^0 - 2a_1(t_B^0 - t_T^0)}{\lambda_2^* - \lambda_1^*} \quad (7.65)$$

$C_1^*, C_2^*$  – константы интегрирования, определяемые из граничных условий;

$$\lambda_{1,2}^* = - \left( 1 \pm \sqrt{1 - 4 \frac{m_T}{\mu_T^2}} \right) a_1 \mu_T \quad (7.66)$$

$\lambda_{1,2}^*$  – корни характеристического уравнения для (7.62).

На основании (7.64)-(7.66) выполнено моделирование температурного поля внутри трубопровода в диапазоне изменения параметра  $a_1$ :  $(7,5 \cdot 10^{-2} \dots 1,0 \cdot 10^{-4})$ , в пределах длины трубопровода до 100 его радиусов (рис. 7.17), а также получены расчётные значения температуры в конце трубопровода в том же диапазоне интенсивности теплообмена (рис. 7.18).

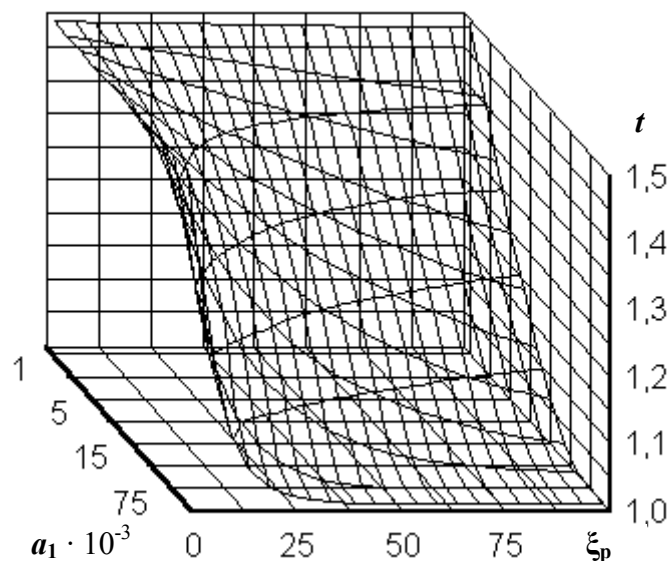


Рис. 7.17. Изменение температуры по длине трубопровода в зависимости от интенсивности теплообмена

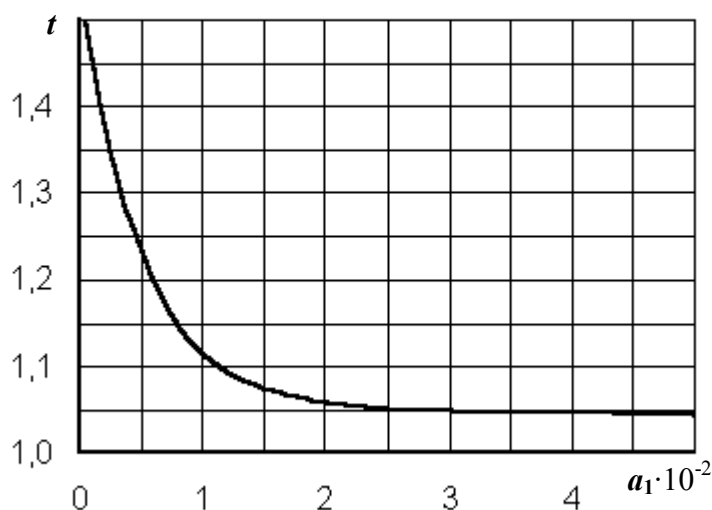


Рис. 7.18. Зависимость температуры в конце трубопровода от интенсивности теплообмена

Решая первое уравнение (3.49) с учетом граничного условия  $T_T(0)=T_H$  (начальное значение температуры), при  $T_B = \text{const}$ ,  $\frac{\Omega_T}{S_T} = \frac{2}{R_T}$ ,  $t_T = T_T / T_B$  получим выражение для определения температуры воздуха в трубопроводе наземной установки в безразмерном виде

$$t_T = 1 + (t_H - 1)e^{-2a_1\xi_p}, \quad 0 \leq t_T \leq 1 \quad (7.67)$$

или в размерном виде

$$T_T = T_B + (T_H - T_B)e^{-2a_1x/R_T}. \quad (7.68)$$

При определении изменения давления и массового расхода воздуха в трубопроводе используем общеизвестные выражения [27].

Зависимость температуры воздуха в трубопроводе диаметром 0,06 м передвижной шахтной установки, работающей от компрессора в выработке, от его длины, в частности при максимально допустимой согласно «Правилам безопасности в угольных шахтах» температуре 26 °С и скорости воздуха 1,0 м/с приведена на рис. 7.19. Эти результаты показывают, что при температуре на входе в теплообменник предохлаждения 60 °С длина трубопровода должна быть равной 40 м.

По зависимостям (7.68-7.70) проведены исследования изменения температуры и давления в трубопроводе наземной установки от температуры окружающей среды, температуры, давления и расхода воздуха на входе в



трубопровод, его геометрических и теплофизических параметров, некоторые результаты которых приведены на рис. 7.20.

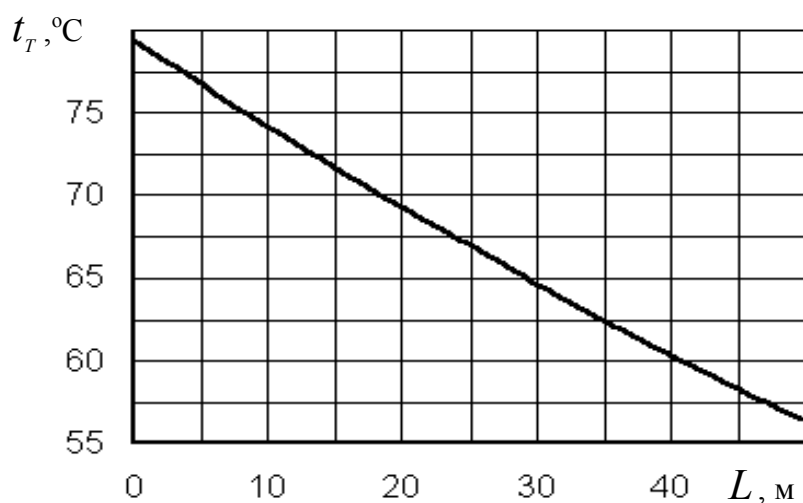


Рис. 7.19. Изменение температуры сжатого воздуха по длине трубопровода передвижной шахтной установки при температуре в выработке  $26^\circ\text{C}$  и скорости воздуха  $1,0\text{ м/с}$

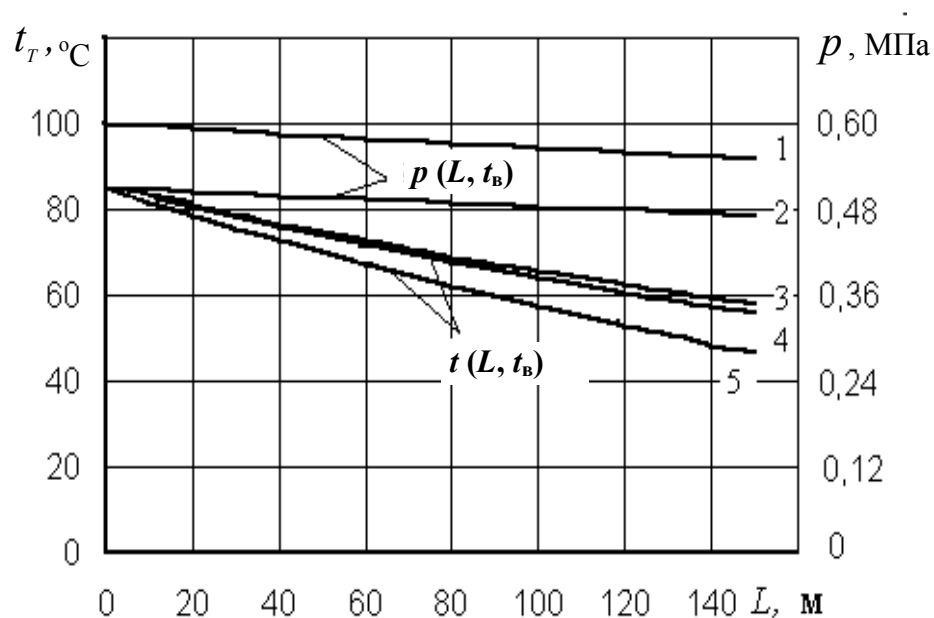


Рис. 7.20. Изменение температуры и давления сжатого воздуха по длине трубопровода наземной установки при температуре окружающей среды:  
 1,2 –  $t_B = 30$  и  $20^\circ\text{C}$ ; 3 – 5 –  $35, 30, 20^\circ\text{C}$

При расчете использованы следующие данные:  $R_T = 0,004$  м;  $\delta_{\text{оз}} = 0,003$  м;  $\lambda_T = 0,158$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С). Давление и расход на входе в трубопровод менялись в пределах (0,3...0,7) МПа и (0,08...0,3) м<sup>3</sup>/с, температура (20...85) °С, длина трубопровода (0...150) м.

Анализ результатов показывает, что на протяжении длины трубопровода 150 м происходит незначительное его падение (до 10 %), а при температуре сжатого воздуха на выходе из компрессора для создания температуры на входе в установку не более 60 °С при температуре окружающей среды (20...35) °С длина трубопровода должна быть равной от 90 до 140 м.

Эти параметры трубопроводов были использованы при экспериментальных исследованиях теплообменных процессов и определении гидравлических параметров составных частей наземной и шахтных установок.

## 7.5. Экспериментальные исследования теплообменных и гидравлических процессов в установках в лабораторных условиях

### 7.5.1 Методика проведения исследований

Целью экспериментальных исследований является проверка работоспособности разработанных технологических схем наземной и шахтных воздушно-морозильных установок и определение адекватности результатов теоретических исследований теплообменных и гидравлических процессов в системе «источник хладоносителя – средства экстренного получения холода – водолеянные охлаждающие элементы».

Для исследования процессов замораживания ОЭ-2 на опытно-экспериментальном полигоне НИИГД «Респиратор» создана лабораторная база, состоящая из сухой подстанции типа ТКШВЦ-320/6, размещенной в крытом помещении, компрессоров марки ЗИФ-ШВ-5М и НВ-10Э, магнитных пускателей, коллектора и манометра. Компрессоры располагались в помещении, примыкающем к экспериментальной штольне. Сухая подстанция с магнитным пускателем, а также пускатель электродвигателей компрессоров соединены высоковольтным кабелем. Коллектор предназначен для отбора воздуха от компрессоров, подключенных к пневмосети параллельно.

Параметры воздуха компрессоров, приведенные к нормальным условиям всасывания – давление 0,1013 МПа, температура 20 °С, следующие:

#### НВ-10Э:

Производительность, м <sup>3</sup> /мин	10 ± 0,4
Давление начальное, МПа, не менее	0,87
Давление конечное номинальное, избыточное, МПа	0,68

#### ЗИФ-ШВ-5М:

Производительность, м <sup>3</sup> /мин	5 ± 0,35
Рабочее давление, МПа	0,6
Минимальное рабочее давление, МПа	0,4 ± 0,05

Пневмопроводы от компрессоров соединяли с коллектором Ду 50, выполненным в виде тройника, на каждом отводе которого установлен пробковый кран Ду 50, с соединительной цанговой головкой ГЦ 50.

Компрессорная станция включает, в общем, четыре компрессора (три ЗИФ-ШВ-5М и один НВ-10Э), подключенных к общему воздухораспределительному устройству, от которого воздух по рукавным линиям подается к экспериментальному образцу наземной морозильной установки. Общий расход воздуха компрессоров при давлении от 0,4 до 0,6 МПа равен около 25 м<sup>3</sup>/мин. Температура сжатого воздуха на выходе из компрессоров в процессе работы свыше (2...3) часов составляла (70...85) °С, а на воздухораспределительном устройстве – (60...80) °С.

По таким параметрам как температура, влажность, давление, сжатый воздух, полученный на полигоне, практически совпадает с параметрами сжатого воздуха, который может быть получен в реальных условиях на поверхности шахты.

Структурная схема наземной воздушно-морозильной установки, ее состав и подсоединение к компрессорной станции показаны на рис. 7.21[23].

Для упрощения конструкции установки в схеме использовали один теплообменник – рекуператор с охлаждением воздухом, выходящей из холодильной камеры, с подключением от одного до четырех турбохолодильников.

Установку подключали к компрессорной станции 1 с помощью прорезиненных рукавов 2. В зависимости от количества подаваемого воздуха число рукавных линий может составлять от одного до трех.

Установка включает в себя коллектор 3, теплообменник 8, фильтр 11, краны 14-17 турбохолодильников 22-25, глушители шума 31, 32, холодильную камеру 29, систему пневмотрубопроводов, соединяющих элементы изделия, приборы и устройства для измерения соответственно расхода 5, 28, давления 4, 7, 9, 18-21 и температуры воздуха 6, 10, 12, 13, 26, 30.

В качестве холодильной камеры использовали камеру холодильника азотной установки «Зима-А», в которой при работе на сжатом воздухе секцию камеры с ОЭ-2 отделяли от теплообменника для газификации азота.

Для подсоединения рукавов к тройникам и отключения отдельных рукавных линий предусмотрены соединительные переходные головки ГП 50×80 и соединительные головки-заглушки ГЗ-50.

Измерительное устройство 5 расхода сжатого воздуха подключали одним концом к тройнику 3, а другим – к входному патрубку теплообменника 8.

Теплообменник 8 для охлаждения сжатого воздуха, поступающего от компрессоров, воздухом, выходящим из холодильной камеры представляет собой кожухотрубный поперечнопроточный, многоходовой по сжатому воздуху, оребренный по наружной поверхности труб аппарат, площадь трубной полости которого 2,5 м<sup>2</sup>, межтрубной – 25 м<sup>2</sup>.

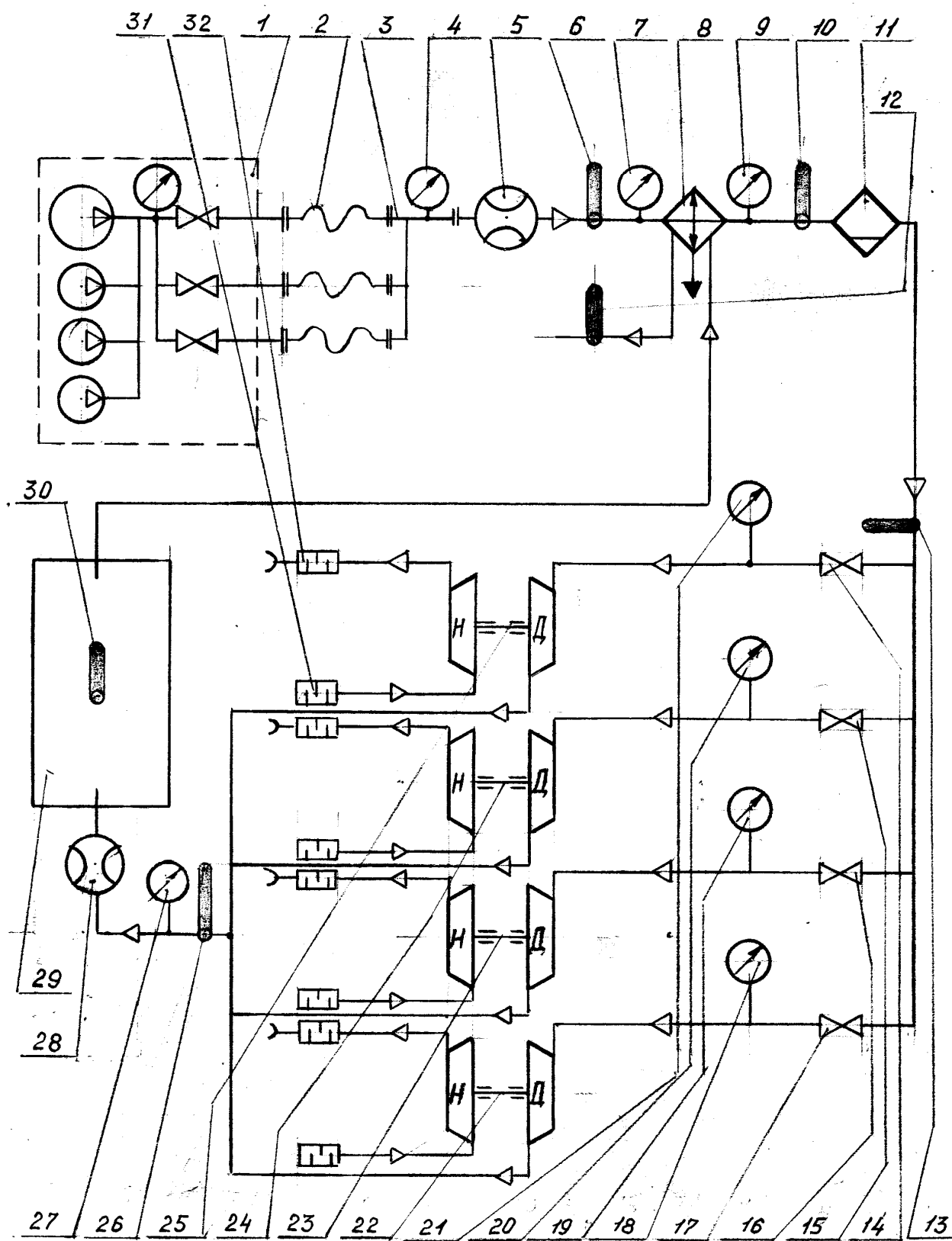


Рис.7.21. Технологическая схема экспериментальной наземной воздушно-морозильной установки с использованием турбохолодильников

Фильтр 11 циклонного типа для очистки сжатого воздуха от механических частиц, масла и капельной влаги с номинальной тонкостью очистки воздуха не более (100...150) мкм. Пробковые краны 14-17 предназначены для регулировки расхода воздуха, поступающего к турбохолодильникам, устанавливали на участках трубопроводов после силикагелевого фильтра 11. Соединение кранов с трубопроводами фланцевое.

В качестве турбохолодильников 22-25 применяли широко используемые в авиации турбохолодильники типа 1277 ТД, работающие при сухом воздухе в трех режимах: для абсолютного давления на входе 0,3 МПа перепад температур на входе и выходе равен 45 °С, при 0,4 МПа – 60 °С, при 0,5 МПа – 75 °С. Турбохолодильники с распределительными коллекторами соединяли с помощью быстроразъемных соединений, а на участке выхода воздуха из турбохолодильников установили устройство для измерения расхода воздуха 28.

Турбохолодильники оснащали глушителями шума 31, 32, имеющими сетки с шириной ячейки не более 0,5 мм.

Объем холодильной камеры 29 обеспечивает размещение в ней 480 ОЭ-2, уложенных на алюминиевые противни, применяемые в установке «Зима-А», а также в решетчатые контейнеры в количестве 432 ОЭ-2.

Принцип действия установки следующий. Перед пуском подключали необходимое количество турбохолодильников, краны 14-17 перекрыты. После пуска компрессорной станции 1, вентили ее распределительного коллектора открывали и воздух по рукавам 2 заполнял пространство устройства 5, трубок теплообменника 8, фильтра 11. Открывая краны 14-17, устанавливали и поддерживали давление на входе в турбохолодильники 22-25 не более 0,5 МПа. При этом воздух, проходя трубное пространство четырехходового поперечнопротивоточного теплообменника 8, фильтр-влагоотделитель 11, очищается от капельной влаги, которая отводится наружу, поступает на вход в турбины детандеров турбохолодильников, охладившись до отрицательной температуры – в холодильную камеру, пройдя которую охлаждает ОЭ-2, дальше – в межтрубное пространство теплообменника 8, нагревается входящим потоком сжатого воздуха трубного пространства и выходит в окружающую среду.

Рабочий режим установки контролировали по манометрам и термометрам. Не допускали снижение температуры сжатого воздуха перед детандером турбохолодильника ниже 1,0 °С.

Структурная схема передвижной шахтной воздушно-морозильной установки с одним турбохолодильником и двумя теплообменниками приведена на рис. 7.22.

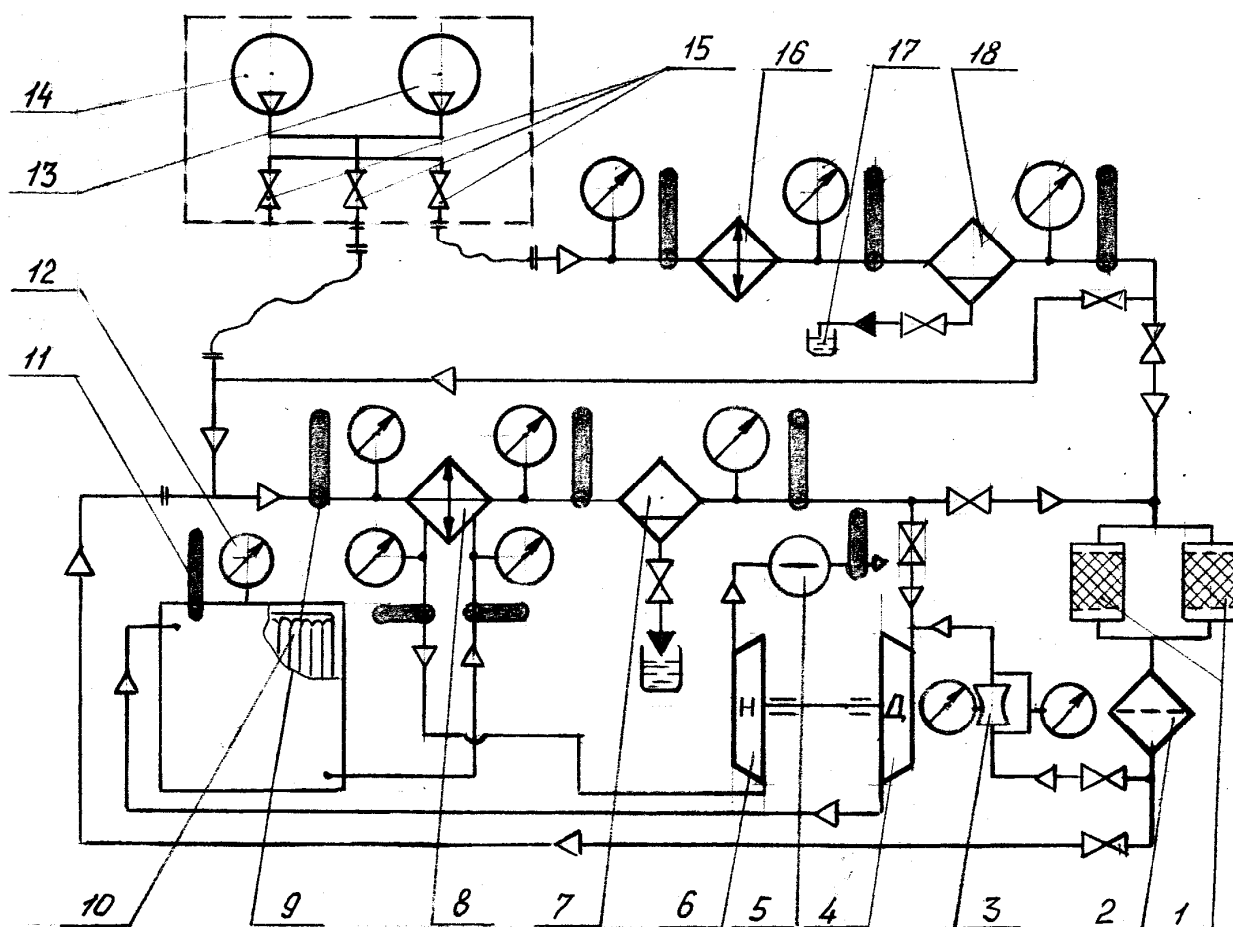


Рис. 7.22. Технологическая схема экспериментальной передвижной шахтной воздушно-морозильной установки с использованием турбохолодильников

Принцип работы: сжатый воздух от компрессора НВ-10Э 13 или ЗИФ-ШВ-5М 14 по гибкой рукавной линии поступает в трубное пространство четырехходового поперечнопроточного теплообменника 8, в котором охлаждается потоком воздуха, выходящего из холодильной камеры 9, до температуры ниже равновесной, соответствующей давлению в теплообменнике. Охлажденный сжатый воздух, проходя фильтр-влагоотделитель 18, очищается от капельной влаги, которая через влагоотделитель отводится из установки наружу, и поступает на вход в турбину детандера 4 турбохолодильника. После расширения в детандере охлажденный до отрицательной температуры воздух через сосредоточенный ввод, выполненный в виде короткого цилиндрического патрубка диаметром 2", поступает в холодильную камеру 9, пройдя которую охлаждает ОЭ-2, размещенные вертикально в контейнерах 10, поступает в межтрубное пространство теплообменника 8 и нагретый в нем входящим потоком сжатого воздуха выходит в окружающую среду или поступает через входной патрубок нагнетателя турбохолодильни-

ка и выходит из установки. При выходе воздуха после теплообменника непосредственно в окружающую среду в холодильной камере в технологическом режиме поддерживается более высокое давление, чем в случае, когда воздух после теплообменника 8 подается на вход в нагнетатель турбохолодильника.

Для исследований параметров установки, работающей в условиях, приближенных к работе от шахтной пневмосети, когда температура сжатого воздуха практически стабильна или изменяется незначительно, использовали схему, при которой сжатый воздух по рукавной линии поступает в трубное пространство многоходового теплообменника 16, где охлаждается, в фильтре 18 отделяется от капельной влаги и далее – в трубное пространство теплообменника 8, охладившись потоком воздуха, выходящим из холодильной камеры 9, очищается от влаги и частично от масла в фильтре-влагоотделителе 7, после которого через детандер 4, холодильную камеру 9, межтрубное пространство теплообменника 8 и нагнетатель 6 (или минуя его) выходит в окружающую среду, а нагнетатель 6 оказывает на рабочий процесс цикла влияние, аналогичное описанному в первой схеме.

Для исследований параметров установки, работающей с осушкой воздуха и размещением фильтра-осушителя в линии высокой температуры сжатого воздуха использовали схему, при которой сжатый воздух, охладившись и очистившись от капельной влаги в теплообменнике 16 и фильтре 18 или, минуя их (на рис. не показано), проходит фильтры-осушители 1, фильтр 2, теплообменник 8, влагоотделитель 7, детандер 4, камеру 9, межтрубное пространство теплообменника 8 и нагнетатель 6, и выходит в окружающую среду.

И, наконец, для исследований параметров установки с включением фильтра-осушителя в линию предохлажденного сжатого воздуха использовали схему, в которой сжатый воздух по рукавной линии, проходя теплообменник 16, фильтр 18, предохлаждается и отделяется от капельной влаги, или, минуя эти устройства, напрямую поступает в теплообменник 8, влагоотделитель 7, фильтры 1 и 2, детандер 4. Охладившись в результате расширения, воздух входит в камеру 9, затем в межтрубное пространство теплообменника 8, нагнетатель 6 и выходит в окружающую среду.

При подаче сжатого воздуха к установкам контролировали рабочие параметры компрессора: температуру и давление по приборам, установленным на пульте управления. С помощью образцового манометра МО-16 с ценой деления 0,01 МПа и ртутного термометра производили контроль давления и температуры сжатого воздуха после распределительного пневмопровода на входе в рукавную линию и выходе из нее, перед и после теплообменников и фильтров влагоотделителей. Давление и температуру измеряли по образцовым манометрам МО-10 с ценой деления 4 кПа и термометрами со шкалой до 100 °С и ценой деления 0,5 °С. Количество капельной влаги во влагоотделителях измеряли весовым способом за отдельные промежутки времени и весь период процесса замораживания ОЭ-2. Давление перед и после теплообменников, влагоотделителей, фильтров контролировали с помощью образцовых манометров МО-10. Расход воздуха на входе в детандер турбохолодильников

1277 ТД измеряли с помощью трубки Вентури, дифманометром ДМИ РУ4, работающим в комплекте с записывающим прибором типа ВФС, регистрирующим перепад давлений с точностью 2 кПа. Температуру воздуха на входе в детандеры турбохолодильников, входе в камеру и выходе из нее измеряли с помощью термопары хромель-копель (ХК) и цифрового милливольтметра В-36 с точностью до 0,01 мВ. Давление внутри камеры 9 замеряли дифманометром-напорометром мембранным ДНМП-100 с верхним пределом измерений 6 кПа; воздуха на входе в межтрубное пространство теплообменников, выходе из него и входе в нагнетатели 6 – с помощью вакуумметра с ценой деления 1 кПа; на выходе из нагнетателей – образцового манометра МО-4 с ценой деления 2 кПа.

Количество воздуха, подаваемого нагнетателями, регистрировали ротационным счетчиком газа 5 типа РГ 400 с точностью до 0,1 м<sup>3</sup>. Давление и температуру воздуха перед счетчиками после нагнетателей измеряли манометром МО-4 с ценой деления 2 кПа и термопарой ХК, подключенной к цифровому милливольтметру, а температуру воздуха на выходе из счетчиков – термометром с точностью 0,5 °С.

Температуру первого (на входе воздуха в холодильную камеру) и последнего (на выходе) охлаждающего элемента и ее изменение за время замораживания измеряли с помощью введенных внутрь ампул термопар ХК и регистрировали цифровым милливольтметром. С целью определения неравномерности замораживания ОЭ-2 в объеме камеры по окончании процесса замораживания, температуру их поверхности измеряли дистанционным измерителем типа SK-8100 (Япония) с диапазоном минус 30 – плюс 400 °С с точностью 0,1 °С. Кроме этого, дополнительно измеряли температуру, давление и влажность окружающего воздуха, начальную температуру камеры.

Количество замороженных ОЭ-2 и характер их замораживания по объему камеры определяли во время кратковременной (1...2 мин) остановки работы установок через 1,0-2,5 часа работы или по завершению эксперимента.

Исследования изменения температуры по длине трубопровода шахтных установок проводили в экспериментальной штольне при скорости воздуха 1 м/с для определения влияния на процесс замораживания ОЭ-2 дополнительного фильтра тонкой очистки (силикагелевого) от влаги, подачи холодного воздушного потока после турбохолодильника в одном направлении с его выходом из камеры в теплообменник, подачи воздуха из теплообменника на нагнетатель турбохолодильника.

В качестве холодильной камеры использовали вагонетку-термос установки «Зима-А», состоящей из двух одинаковых по объему частей, в которых располагались по четыре контейнера в каждой с вертикальным расположением 200 шт ОЭ-2.

Для определения наиболее интенсивного и равномерного замораживания ОЭ-2 по объему камеры исследовали три схемы воздухораспределения (рис. 7.23).

Согласно Схеме «а»:



Холодный воздух из детандера турбохолодильника через патрубок 1 входит в первую часть камеры 2. Одна часть воздуха поступает через канал 5, образованный днищем камеры 9, уголками 8, контейнерами 3 с ОЭ-2 снизу вверх, омывая вдоль ОЭ-2, проходит через соединительный патрубок во вторую часть камеры. Другая часть воздуха, в результате расширения струи и распределения ее в объеме камеры диагонально, проходит между ОЭ-2 и также через соединительный патрубок входит во вторую часть, заполняя объем между ОЭ-2, не изменяя направления по диагонали, и через патрубок 10 выходит из камеры.

В Схеме «б»:

Обе части камеры разделены перфорированными перегородками 11-14 на две секции. При этом с целью более равномерного распределения воздуха по камере в первой части перегородка 11 частично (на три четверти или на половину) прикрывает канал 5, а во второй для образования секции канал 5 перекрыт перегородкой 14. В данном случае воздух проходит через канал 5 и отверстия перегородок.

В Схеме «в»:

Обе части камеры разделены на четыре секции с помощью перегородок без отверстий 15-22 по объему и в канале 5.

Воздух, поступивший в первую часть 1, снизу вверх через первую секцию и охлаждая ОЭ-2 по их длине, через вторую, третью, четвертую секцию первой части, соединительный патрубок 6 и четыре секции второй части выходит из камеры.

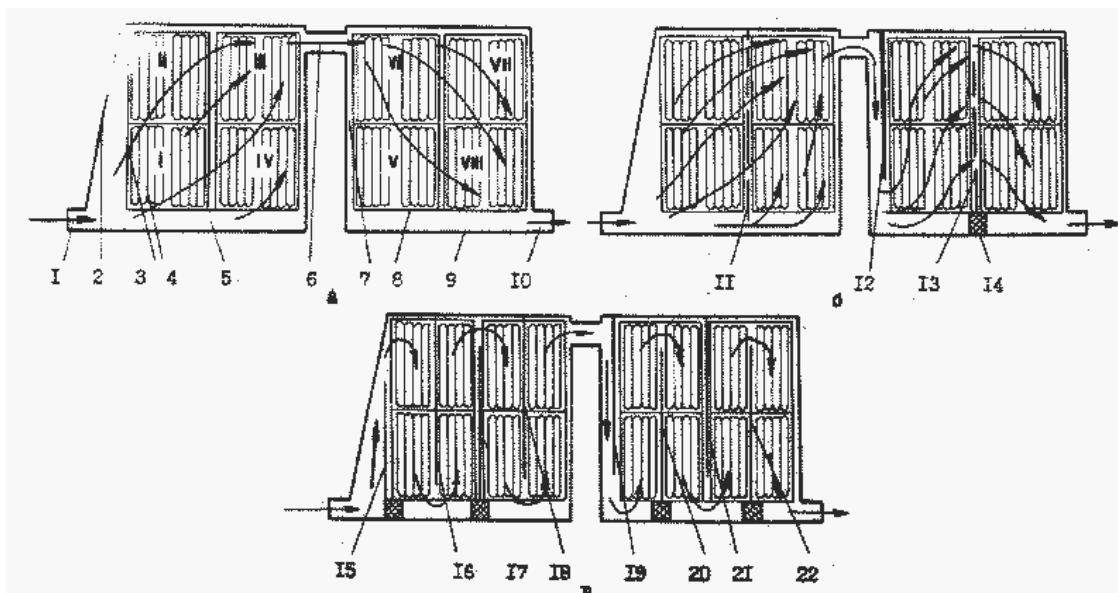


Рис. 7.23. Схемы воздухораспределения в холодильной камере шахтной воздушно-морозильной установки с использованием турбохолодильников: а – односекционная; б – двухсекционная; в – четырехсекционная; 1 – входной патрубок; 2 – первая часть камеры; 3 – контейнер; 4 – охлаждающий элемент; 5 – канал; 6 – соединительный патрубок; 7 – вторая часть камеры; 8 – уголок; 9 – днище камеры; 10 – выходной патрубок; 11-22 – перегородки

В результате проведенных экспериментальных исследований будет выбрана наиболее рациональная схема камеры и определено минимальное время замораживания ОЭ-2.

Основными задачами лабораторных исследований являются:

- исследование теплообменных и гидравлических процессов в основных составных элементах установок;
- влияние условий окружающей среды на параметры и эффективность работы установок;
- определение производительности установок;
- определение адекватности результатов теоретических исследований с данными экспериментов.

7.5.2. Исследование теплообменных, гидравлических процессов в морозильных установках и определение адекватности результатов теоретических исследований

При работе компрессоров ЗИФ-ШВ-5 (от одного до трех) и НВ 10Э при температурах окружающего воздуха от 3 до 30 °С, происходило повышение температуры сжатого воздуха до (70...90) °С. Стабилизация его температуры на выходе из компрессоров наступила через (25...30) мин в летний период времени и через (45...60) мин – в зимний период.

Температура сжатого воздуха при прохождении по воздухораспределительному коллектору и расходе до 15 м<sup>3</sup>/мин понижалась на (10...15) °С и на входе в установки составляла (65...75) °С, потери давления на этом участке составляли (0,02...0,035) МПа.

При движении нагретого сжатого воздуха по прорезиненным пожарным трубопроводам снижение температуры и потери давления зависят от диаметра и длины, расхода сжатого воздуха на входе в трубопровод, температуры и скорости наружного воздуха. Некоторые данные экспериментальных и результаты теоретических исследований для наземной и передвижной шахтной установок приведены на рис. 7.24, максимальная погрешность которых не превышает 10 %.

В дальнейшем, для создания температуры сжатого воздуха на входе в установки с турбохолодильниками не выше 60 °С, учитывая температуру окружающего воздуха, определяли расчетным путем и использовали длины трубопроводов с внутренним диаметром  $7,7 \cdot 10^{-2}$  м для наземной и  $6,0 \cdot 10^{-2}$  м для шахтной установок.

Исследования теплообменных процессов в наземной установке с использованием холодильной камеры установки «Зима-А» показали следующее.

При давлениях сжатого воздуха (0,3...0,5) МПа и температурах 10...20 °С сжатого воздуха перед детандерами турбохолодильников в течение времени работы установки (0,5...3) ч температура в холодильной камере повышается в среднем от минус 20 до минус 10 °С.

При установлении избыточного давления перед детандером турбохолодильника от 0,3 до 0,5 МПа количество воздуха, проходящего через детандер

составляет от 6,1 до 7 м<sup>3</sup>/мин. Для обеспечения номинального рабочего давления перед двумя и тремя турбохолодильниками, одновременно и параллельно работающими на холодильную камеру, необходимо обеспечить расход воздуха в пневмосети от 15 до 22 м<sup>3</sup>/мин, соответственно.

Время охлаждения внутренней поверхности оболочки камеры и металлических поддонов при расширении воздуха в двух турбохолодильниках от (0,3...0,32) МПа до атмосферного давления и температуры воздуха в камере минус (10...11) °С равно 40 мин, так как температура воздуха на выходе из камеры стабилизировалась и составляла минус (10...10,5) °С. Это время в зависимости от расхода холодного воздуха и начальной температуры камеры составляет от 25 до 45 мин.

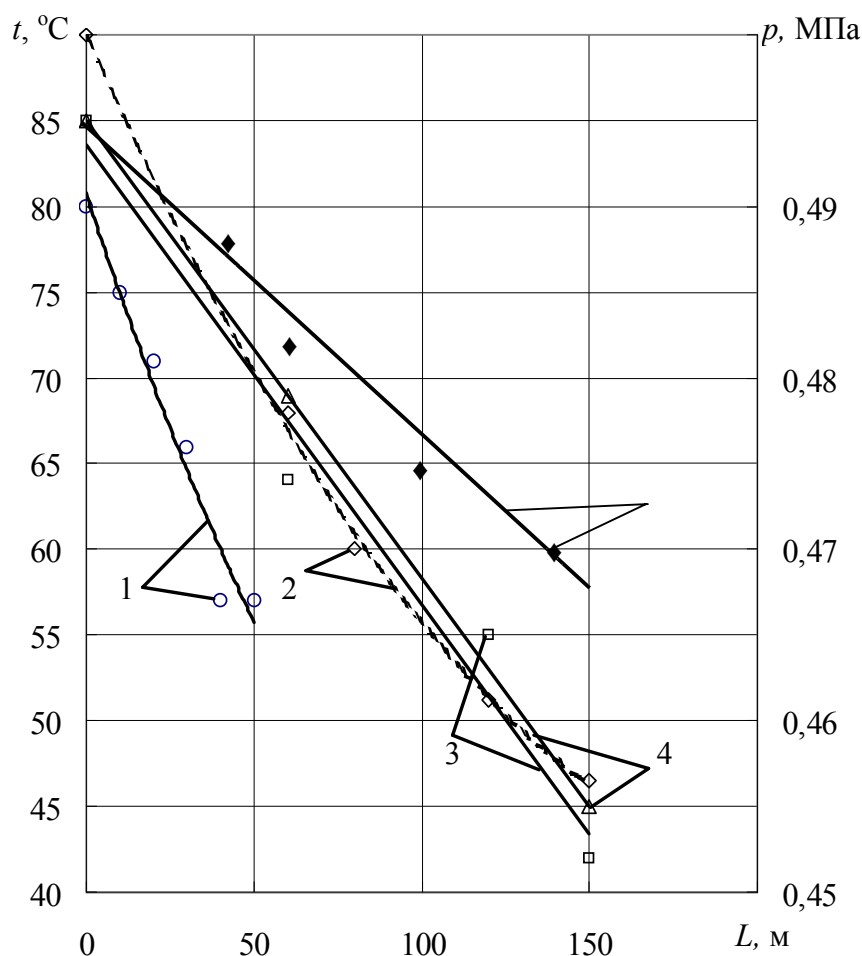


Рис. 7.24. Экспериментальные данные и теоретические зависимости изменения температуры (1, 3, 4, 5) и давления (2) по длине трубопроводов передвижной шахтной (1) и наземной (2-5) установок от температуры окружающей среды  $t_b$  и скорости воздуха  $u_b$ :

1 –  $t_b = 25$  °C,  $u_b = 1,0$  м/с; 2 –  $t_b = 20$  °C,  $u_b = 0,1$  м/с;

3, 4, 5 –  $t_b = 15$  °C, 20 °C и 35 °C,  $u_b = 0,1$  м/с

При определении времени и качества замораживания ОЭ-2 в количестве 432 ед. размещенных в камере на цельнометаллических поддонах, расход воздуха, поступающего в камеру, изменяли путем включения в работу двух или трех турбохолодильников, обеспечивая максимальные давление и расход сжатого воздуха компрессоров 0,6 МПа и 25 м<sup>3</sup>/мин, соответственно.

Результаты двух экспериментов из серии испытаний наземной установки представлены на рис. 7.25, 7.26. Общие исходные данные для этих экспериментов: включение в схему двух параллельно работающих турбохолодильников, сжатый воздух подавали к установке от двух компрессоров с расходом 15 м<sup>3</sup>/мин, а холодный воздух – в камеру через один общий цилиндрический канал, выполненный в боковой стенке камеры. Переменными параметрами являются: температура воздуха окружающей среды  $t_0$ , температура  $t_D$  и давление  $P_D$  на входе в турбохолодильники, средний расход воздуха  $Q_y$  на оба турбохолодильника. Время работы установки 2 ч 45 мин.

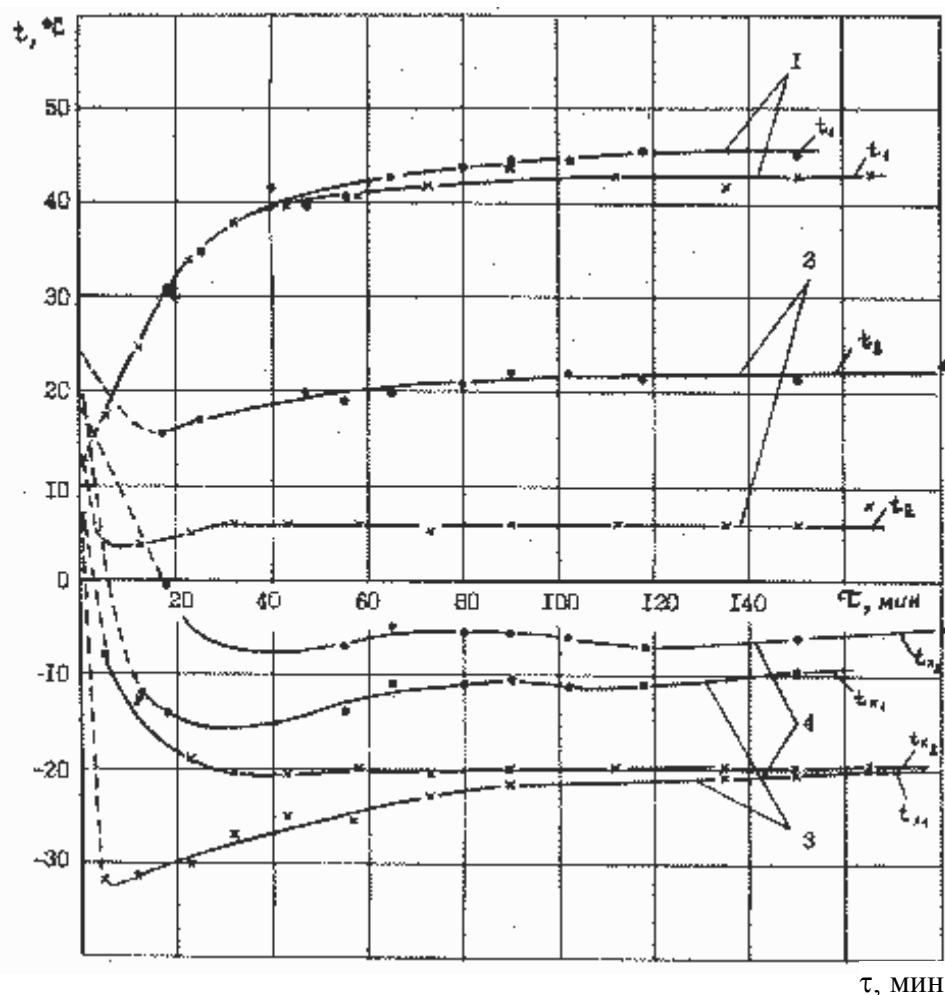


Рис. 7.25. Изменение во времени температуры сжатого воздуха на входе в теплообменник предохлаждения 1, перед детандером 2, на входе 3 и выходе 4 холодильной камеры наземной установки:

- × –  $t_0 = 15^\circ\text{C}$ ,  $Q_y = 13,2 \text{ м}^3/\text{мин}$ ,  $P_D = 0,34 \text{ МПа}$
- –  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $Q_y = 12,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ ,  $P_D = 0,35 \text{ МПа}$

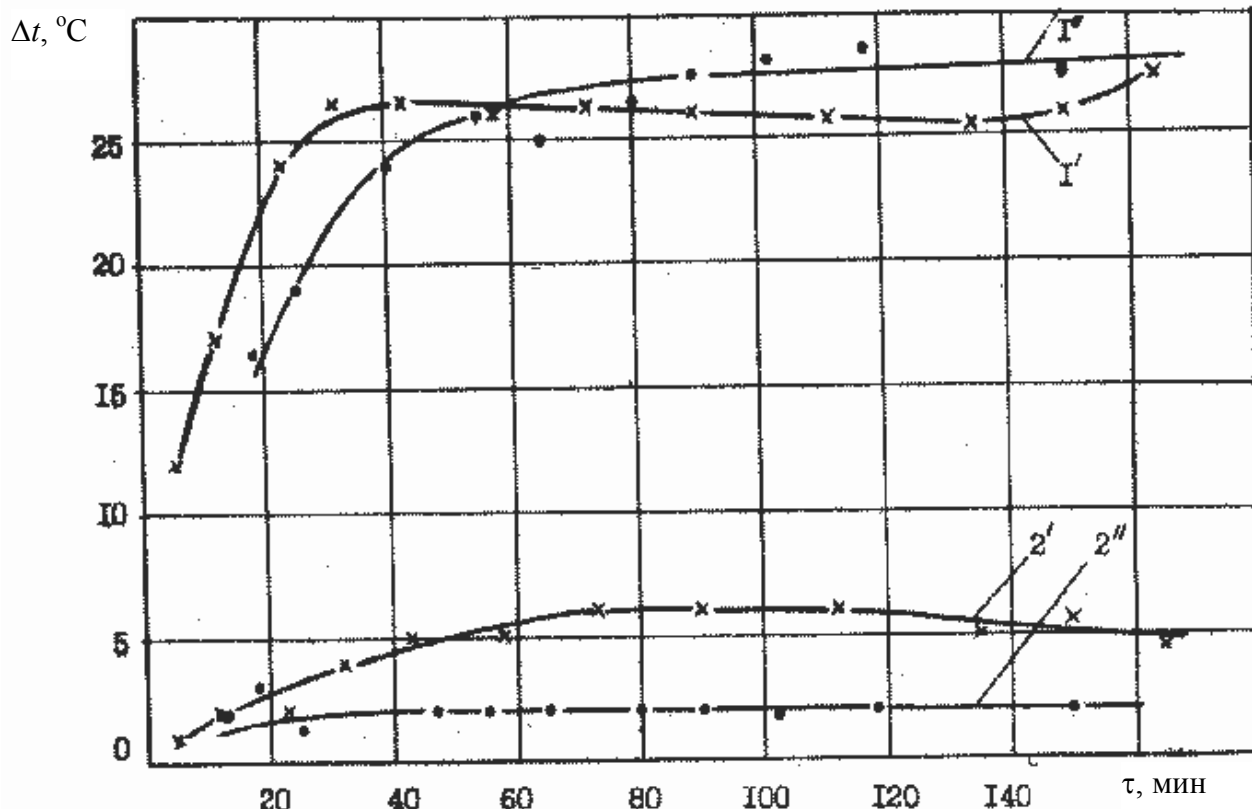


Рис. 7.26. Изменение температурных напоров на теплообменнике предохлаждения наземной установки при перекрестном противотоке теплоносителей:

1', 1'' – на горячем, 2', 2'' – на холодном концах теплообменника

× –  $t_0 = 15^\circ\text{C}$ ,  $Q_y = 13,2 \text{ м}^3/\text{мин}$ ,  $P_d = 0,34 \text{ МПа}$ ,  $t_d = 6^\circ\text{C}$

● –  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $Q_y = 12,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ ,  $P_d = 0,35 \text{ МПа}$ ,  $t_d = 20^\circ\text{C}$

Изменение во времени температур сжатого воздуха на входе в теплообменник предохлаждения, перед детандером турбохолодильника, а также температур на входе в холодильную камеру и на выходе из нее приведено на рис. 7.25. Эти параметры характеризуют процессы, протекающие в установке в течение первого замораживания, т. е. тогда, когда имеет место охлаждение камеры и потери холода через ограждения максимальны. Для данных обоих экспериментов характерно резкое изменение температур в течение 40 мин. работы установки, затем наступает ее стабилизация. Следует отметить, что, несмотря на некоторые отличия параметров, значения температур на входе в теплообменник при обоих испытаниях близки, а более низкая отрицательная температура на входе в камеру возникает при снижении температуры на входе в детандер турбохолодильника. Выравнивание температур на входе и выходе камеры при работе установки (2...2,5) ч указывает на то, что процесс замораживания и переохлаждения ОЭ-2 завершен: их температура составляла от минус 4 до минус  $15^\circ\text{C}$ . Изменение разности температур на «холодном» и «горячем» концах теплообменника одного рабочего цикла приведено на

рис. 4.6. Малый температурный напор на «горячем» конце указывает на недостаточно эффективную работу теплообменника при тепловых нагрузках, вносимых со сжатым воздухом и имеющем температуру свыше 40 °С. При этом результаты исследований показали, что из-за весьма неравномерного распределения воздуха в холодильной камере с цельнометаллическими поддонами количество замороженных ОЭ-2 составляло около 100 ед. в час, что явно недостаточно. Конструктивные изменения холодильной камеры установки «Зима-А»: замена цельнометаллических поддонов решетчатыми контейнерами, три боковых канала диаметром  $5 \cdot 10^{-2}$  м, соединенных с каждым турбохолодильником, а также подача сжатого воздуха от четырех компрессоров с расходом 25 м<sup>3</sup>/мин, позволили увеличить количество замороженных ОЭ-2 до 150 ед., что является также недостаточным.

Следовательно, наземная морозильная установка с использованием холодильной камеры установки «Зима-А» и решетчатых контейнеров не обеспечивает необходимой производительности, требует существенных конструктивных изменений, и не может использовать, в случае такой необходимости, в качестве хладоносителя сжатый воздух или жидкий азот. Производительность установки может быть повышена за счет предварительного охлаждения сжатого воздуха перед теплообменником, снижения его влагосодержания и улучшения воздушораспределения.

В связи с этим, для дальнейших исследований использовали технологическую схему наземной установки с тремя вариантами распределения воздушного потока в холодильной камере.

При использовании схемы «а» в обеих частях камеры образуется ряд зон, в которые не поступает достаточное количество охлаждающего воздуха. В первой части камеры такие зоны возникают в месте расположения II контейнера и верхней части I и III контейнеров, во второй части они формируются в месте расположения V и нижней части VI контейнеров. Это приводит к неравномерному распределению воздуха по всему объему камеры и не позволяет заморозить в первой ее части все количество ОЭ-2 (200 ед.) при работе установки в течение 3-х часов. Через 1,5-2,0 часа количество незамороженных ОЭ-2 составляет 10-15 %, т.е. (20-30 ед.).

При работе установки в течение (1,5... 2,0) часа со схемой «б» в контейнере II первой части камеры количество незамороженных ОЭ-2 составило (5...7,5) % (10-15 шт.). При этом во второй секции незамороженные ОЭ-2 находились в верхней правой части VI и в нижней части VIII контейнеров.

При распределении воздуха по схеме «в» увеличивается скорость его движения в секциях, что повышает интенсивность замораживания ОЭ-2. За 1,5 часа в первой части камеры были заморожены все 200 ед. Во второй секции интенсивность замораживания ОЭ-2 была ниже, чем за то же время по схеме «б». Это обусловлено тем, что в результате более быстрого отвода тепла в первой части камеры, воздух поступает во вторую ее часть, с более высокой температурой.

На основании предварительных испытаний, дальнейшие исследования процесса замораживания ОЭ-2 в установке проводили по схемам, приведенным на рис. 7.13 и рис. 7.23, с распределением воздуха в камере по схеме «в».

Данные экспериментальных и результаты теоретических исследований динамики температуры ОЭ-2 в камере наземной установки с предохлаждением теплообменника с помощью воздуха, выходящего из турбохолодильника, приведены на рис. 7.27.

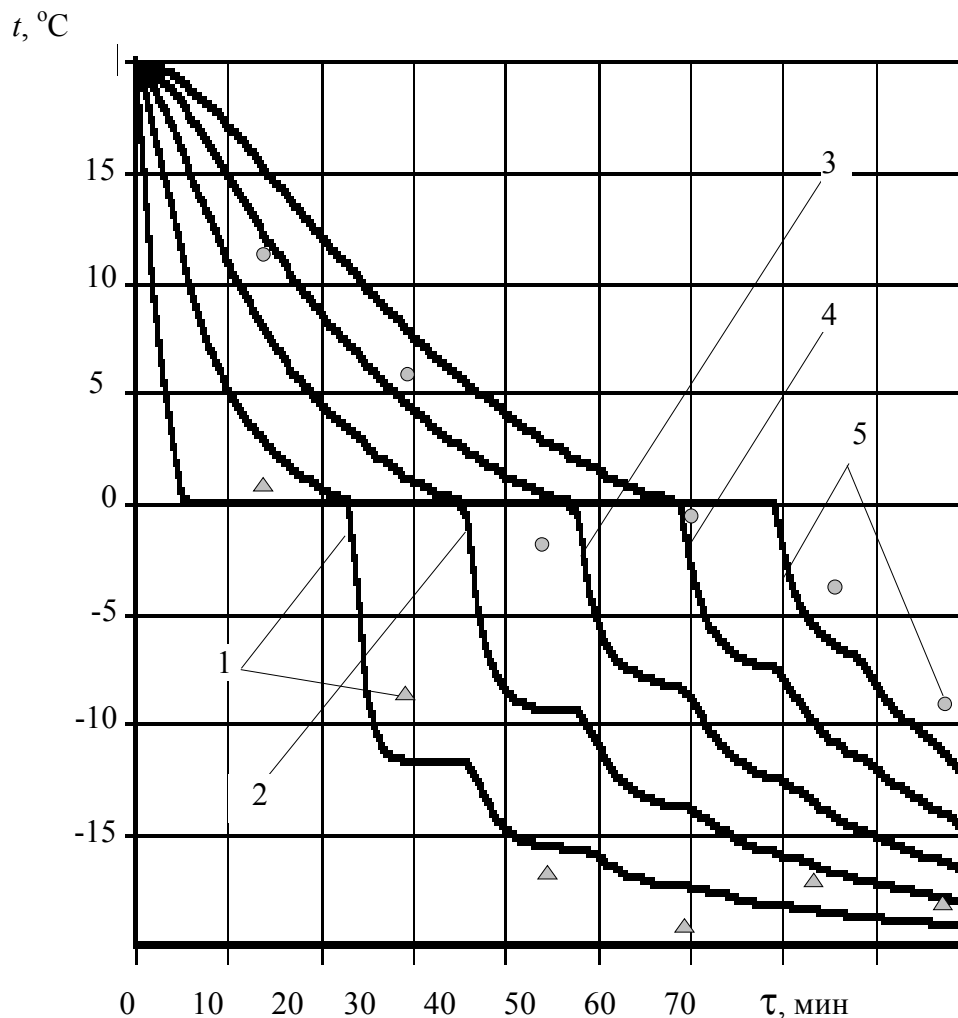


Рис. 7.27. Динамика температуры ОЭ-2 при  $t_{\text{вх}} = -20^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = 18^\circ\text{C}$ :  
1,5 – номера ОЭ-2 первого (на входе) и последнего (на выходе) контейнеров; 2,3,4 – номера ОЭ-2 промежуточных контейнеров;  
 $\Delta$ ,  $\circ$  – данные экспериментов

Анализ данных экспериментов и результатов теории показывает, что средняя погрешность времени достижения одинаковых температур первых (на входе камеры) и последних (на ее выходе) ОЭ-2 в контейнерах в течение 90 мин работы установки составляет около 23 %, причем максимальная его погрешность (около 50 %) наблюдается при работе установки в течение 30 мин. Это обстоятельство объясняется тем, что мы не учли изменение скорости воздушного потока по объему камеры, ввиду сложности моделирования процесса замораживания в ней ОЭ-2, расположенных в решетчатых контейнерах с воздушным зазором между ними.

Несмотря на то, что была использована схема «в» по распределению воздуха в камере, требуемая температура замораживания ОЭ-2 около минус 10 °С на входе в камеру почти в два раза ниже, чем на ее выходе. Погрешность времени достижения этой температуры не превышает 10 %, а производительность установки (300 ед. в течение 90 мин) составляет 200 ОЭ-2 в час.

В то же время, при охлаждении сжатого воздуха в теплообменнике водой с температурой 20 °С и ее расходом 9,7 м<sup>3</sup>/ч время замораживания ОЭ-2 составило 56 мин, то есть примерно в 1,6 раза меньше, чем воздухом турбохолодильника, что подтверждается результатами теоретических исследований (см. рис. 7.16) и данными ниже – приведенных исследований. Следовательно, требуемая производительность наземной воздушно-морозильной установки обеспечена.

Более длительные и детальные исследования теплообменных и гидравлических процессов проводили в передвижной шахтной установке, которая может быть использована для замораживания ОЭ-2 на поверхности и в горных выработках шахт.

В связи с тем, что вместимость камеры переносной шахтной установки составляет 175 ОЭ-2 в семи контейнерах четырех секциях, одновременное их замораживание обеспечить невозможно, а оснащение ими противотепловой одежды горноспасателей должно происходить, как правило, непрерывно, то использовали следующую последовательность замораживания ОЭ-2. При замораживании ОЭ-2 до температуры около минус 10 °С в первых трех секциях от входа воздуха в камеру, контейнеры отсюда вынимали, в две секции укладывали два контейнера последней секции, а в свободные секции, т.е. пять контейнеров укладывали с новыми ОЭ-2. Фиксировали время достижения указанной температуры ОЭ-2 в количестве 225 ед. за первый и второй циклы.

Данные исследований теплообменных и гидравлических процессов в передвижной шахтной установке, а также время замораживания ОЭ-2 в зависимости от температур наружного воздуха, на входе в детандер турбохолодильника и в холодильную камеру, приведены в табл. 7.6 и 7.7.

В этих таблицах введены следующие обозначения:  $\tau$  – время исследований;  $t_0, \varphi, P_0$  – температура, влажность и давление воздуха окружающей среды;  $t_{0\text{ ОЭ}}$  – начальная температура охлаждающих элементов;  $N_{\text{ОЭ}}$  – количество ОЭ-2;  $Q_y, t_H$  – расход и начальная температура сжатого воздуха;  $P'_1, t'_1$  – давление и температура сжатого воздуха на входе в теплообменник предохлаждения установки,  $P'_2, t'_2$  – давление и температура сжатого воздуха на выходе из рекуперативного теплообменника установки;  $P'_3, t'_3$  – давление и температура сжатого воздуха на выходе из фильтра циклонного типа;  $P_T$  – давление сжатого воздуха на входе в теплообменник установки;  $P_D, t_D$  – давление и температура сжатого воздуха на входе в турбохолодильник.



Таблица 7.6

Данные экспериментальных исследований теплообменных и гидравлических процессов  
в передвижной шахтной установке

$\tau$ , ч	Метеоданные			$t_{003}$ , °C	$N_{03}$ , шт.	$Q_y$ , м³/мин	$P'_1$ , МПа	$t'_1$ , °C	$P'_2$ , МПа	$t'_2$ , °C	$P'_3$ , МПа	$t'_3$ , °C	$P_T$ , МПа	$P_D$ , МПа	$t_{D'}$ , °C	$t_{H'}$ , °C	Температура в секциях камеры, °C			
	$t_0$ , °C	$B$ , %	$P_0$ , мм. рт. ст														1	2	3	4
Первый цикл замораживания																				
Начало работы																				
12.30	15	85	748	15	225	13,0	0,56	15	0,48	10,0	0,57	10,0	0,457	0,460	5,2	39	-32,0	-30,4	-29,7	-26,0
12.32							0,54	29	0,47	12,0	0,54	10,0	0,463	0,446	7,0	52	-25,6	-26,7	-27,3	-23,2
12.45							0,53	43	0,46	31,0	0,54	30,5	0,460	0,445	11,4	55	-20,3	-21,4	-22,6	-18,1
13.15							0,55	43	0,47	35,0	0,56	33,0	0,470	0,454	12,3	58	-18,7	-19,8	-20,1	-15,0
13.30							0,54	45	0,47	37,0	0,55	35,5	0,465	0,448	13,6	58	-16,2	-17,6	-18,4	-13,0
13.45							0,54	46	0,47	38,5	0,54	38,0	0,463	0,448	14,0	58	-14,0	-14,5	-15,0	-11,2
13.58							0,54	46	0,47	38,5	0,54	38,0	0,463	0,448	14,0	58	-14,0	-14,5	-15,0	-11,2
Второй цикл замораживания																				
14.03	15	85	748	от	225	13,0	0,54	43	0,47	37,0	0,55	35,4	0,460	0,447	11,2	57	-30,6	-29,3	-27,4	-25,7
14.20				+5			0,54	44	0,47	38,3	0,54	37,8	0,464	0,448	14,1	58	-24,3	-25,3	-24,5	-22,1
14.40				до			0,54	45	0,47	38,5	0,55	38,0	0,463	0,448	14,2	58	-19,6	-20,4	-20,8	-17,4
15.00				-2			0,54	46	0,47	38,6	0,55	38,1	0,464	0,449	14,4	58	-14,2	-14,8	-15,5	-13,0

Таблица 7.7

Результаты экспериментальных исследований по замораживанию ОЭ-2  
в камере передвижной шахтной установки  
при  $N_{\text{ОЭ}} = 225$  шт.,  $P_{\text{Д}} = 0,5$  МПа,  $Q_y = 13$  м<sup>3</sup>/мин

$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ОЭ}}, ^\circ\text{C}$	Температура на входе в камеру $t_{\text{ВХ}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{Д}}, ^\circ\text{C}$	Время замо- раживания ОЭ-2 $\tau_3, \text{ч}$
1	2	3	4	5
5	-3	-12	10	0,75
5	-5	-12	10	0,87
5	-12	-12	10	1,00
5	-10	-12	10	1,15
10	-3	-12	10	0,92
10	-5	-12	10	1,14
10	-7	-12	10	1,25
10	-10	-12 (-25)	10 (2)	1,35 (0,83)
20	-3	-12	10	1,15
20	-5	-12	10	1,25
20	-7	-12	10	1,35
20	-10	-12 (-21)	10 (3)	1,45 (0,93)
30	-3	-12	10	1,20
30	-5	-12	10	1,30
30	-7	-12	10	1,40
30	-10	-12 (-20)	10 (4)	1,50 (0,95)
35	-3	-12	10	1,25
35	-3	-12	10	1,35
35	-7	-12	10	1,45
35	-10	-12 (-20)	10 (4)	1,50 (0,94)
10	-3	-15	15	1,25
1	2	3	4	5
10	-10	-15	15	1,40
10	-3	-17	20	1,50
10	-10	-17	20	1,75
35	-3	-17	20	1,60
35	-10	-17	20	1,92
35	-3	-20	20	1,40
35	-10	-20	20	1,60
35	-10	-12	20	2,50

Данные, приведенные в табл. 7.7, округляли до целых, за исключением времени замораживания, а в скобках приведены соответствующие данные с

использованием охлаждения сжатого воздуха в теплообменнике водой из водофильтрующего устройства, откуда следует, что время замораживания ОЭ-2 примерно в 1,6 раза меньше, чем при охлаждении теплообменника воздухом турбохолодильника.

Данные эксперимента и результаты теоретических исследований по динамике температуры воздуха в характерных точках установки с воздушным и водяным охлаждением теплообменника, а также динамика температур в секциях холодильной камеры и на входе в турбохолодильник за два цикла замораживания ОЭ-2 (см. табл. 7.6), приведены на рис. 7.26 и 7.27.

Максимальная погрешность результатов теории и данных экспериментов равна около 11 % (см. рис. 7.26).

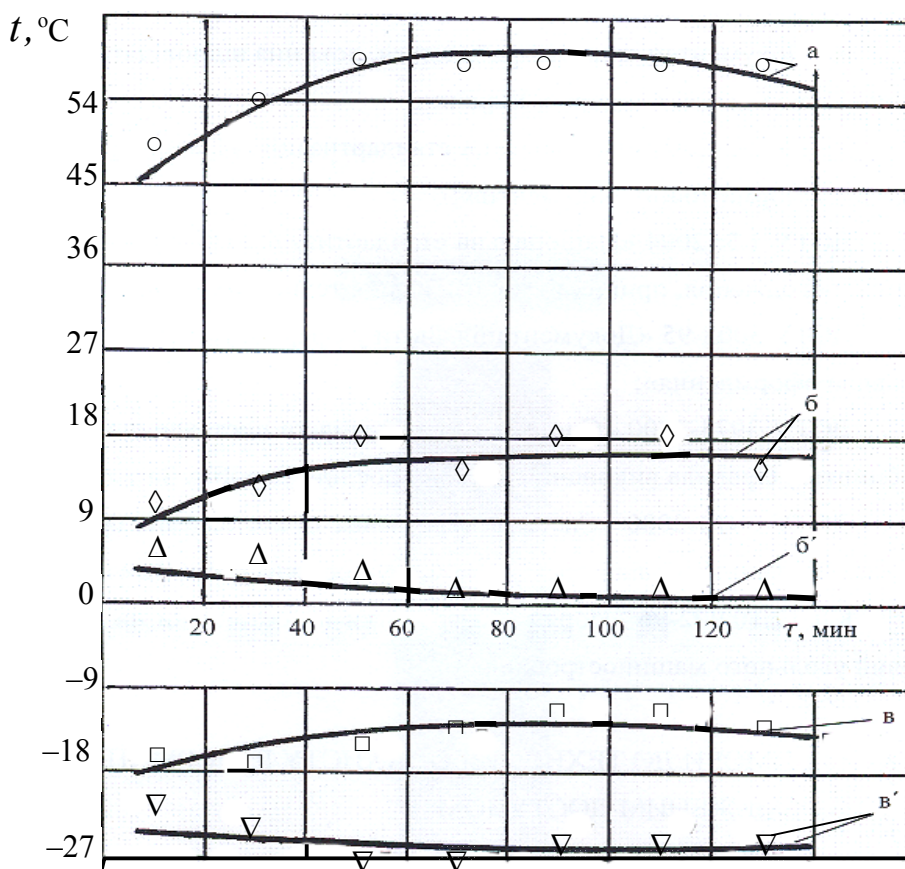


Рис. 7.26. Зависимость температуры воздуха в некоторых точках составных частей морозильной установки от времени:

а – в точке 1 (рис. 3.1);

б, б' – в точке 3 с воздушным и водяным предохлаждением;

в, в' – в точке 4 с воздушным и водяным предохлаждением теплообменника;

○, ◇, △, □, ▽ – данные эксперимента;

— — результаты расчета.

Как следует из рис. 7.27 и табл. 7.6, при изменении температуры на входе в турбохолодильник (кривая 5) от 5,2 до 14 °С, температура в камере (кривые 1-4) меняется в течение 90 мин в пределах от минус (26...32) °С до минус

(11,2...15) °C, что говорит о достаточно равномерном распределении потока по объему камеры.

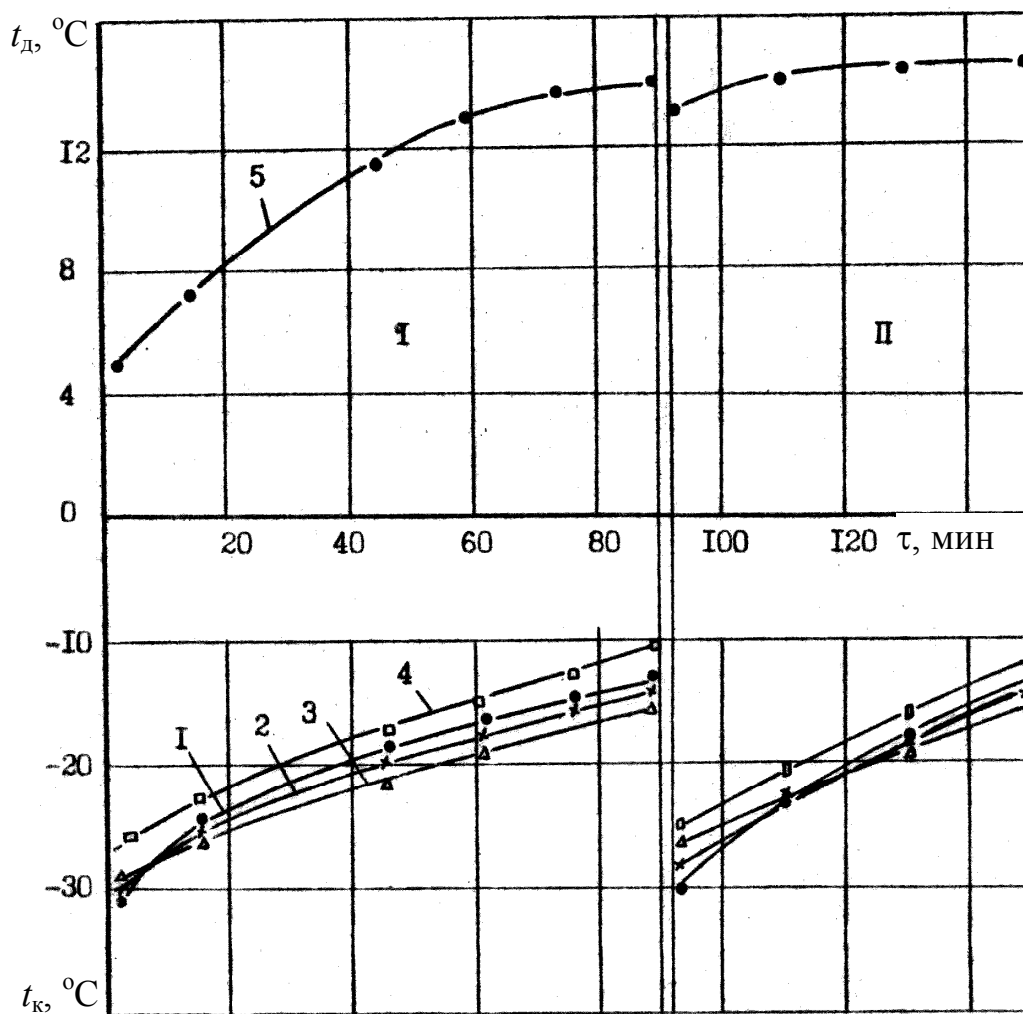


Рис. 7.27. Динамика изменения температур в секциях (1-4) камеры, на входе в турбохолодильник (5) передвижной шахтной установки:  
I, II – первый и второй циклы замораживания

При расходе сжатого воздуха 7 м<sup>3</sup>/мин перепад давления в установке составляет около 0,1 МПа. Если первый цикл замораживания равен примерно 100 мин, то второй – 70 мин., т.е. 450 ОЭ-2 за 170 мин или 160 ОЭ-2 за один час.

На основании полученных результатов построена номограмма (рис. 7.28) для определения времени замораживания ОЭ-2 в передвижной шахтной установке в зависимости от основных параметров: температур воздуха окружающей среды, ОЭ-2, на входе в холодильную камеру и на входе в детандер турбохолодильника.

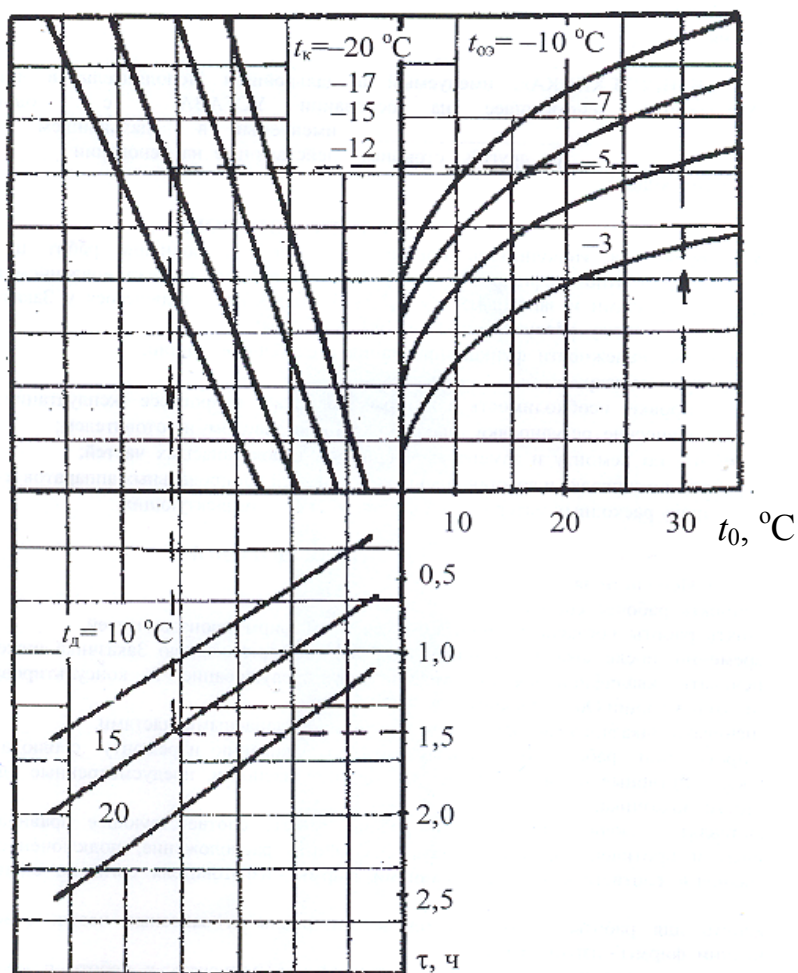


Рис. 7.28. Номограмма для определения времени замораживания охлаждающих элементов ОЭ-2 в передвижной шахтной установке с воздушным предохлаждением теплообменника при  $N_{\text{ОЭ}} = 225$  шт,  $P_{\text{д}} = 0,5$  МПа,  $Q_y = 7$  м<sup>3</sup>/мин:

$t_0, t_{0\text{ОЭ}}, t_{\text{ВХ}}, t_{\text{Д}}$  – температуры воздуха окружающей среды, ОЭ-2, на входе в холодильную камеру, на входе в детандер турбохолодильника

Из рис. 7.28 следует, что определяющим параметром, влияющим на время замораживания, является температура на входе в детандер турбохолодильника. Так, при изменении температуры на его входе от 20 до 10 °С время замораживания ОЭ-2 уменьшается в (1,3-1,7) раза.

В ходе проведения экспериментов установлено, что после 4-5 циклов работы установки (6-7,5 ч) фильтр тонкой очистки, емкость которого составляет 20 кг силикагеля, недостаточно очищает сжатый воздух от влаги, в результате чего в камере постепенно возрастает количество выделившейся снежной массы, а в верхней части поверхности силикагеля образуется масляный слой. Это обстоятельство приводит к увеличению сопротивления фильтра и, в конечном счете, к ухудшению процесса замораживания ОЭ-2. Поэтому, в наземной и передвижной шахтной морозильных установках предусмотрены масляные фильтры для очистки от масла и более совершенные фильтры

тонкой очистки воздуха от влаги, которые были использованы в дальнейшем при их испытаниях в шахтных условиях.

Исследования процесса замораживания в переносной шахтной установке с вихревыми трубами проводили с учетом наиболее характерных условий в горных выработках шахт. В результате исследований получено, что при параметрах сжатого воздуха: давлении 0,45-0,5 МПа, расходе 0,4 м<sup>3</sup>/с, температуре 30 °С, и температуре воздуха окружающей среды 25 °С при втором и третьем замораживании ОЭ-2 ее производительность составляет 100 ОЭ-2 в час. Этого количества ОЭ-2 достаточно для оснащения шести курток ТК-50 отделения горноспасателей.

Увеличить производительность переносной установки можно, используя двухкамерные оребренные вихревые трубы, но это приведет к усложнению конструкции и увеличению массы установки.

### 7.5.3. Производственные испытания установок и их параметры

Цель испытаний – проверка работоспособности и производительности воздушно-морозильных установок в реальных условиях шахты, соответствия их требованиям, изложенным в подразделе 2.2 для разработки тактики применения.

Для замораживания ОЭ-2 с помощью воздуха в наземных и подземных условиях шахты, доставки их в горные выработки и к месту ведения аварийно-спасательных работ горноспасателями в противотепловой одежде, изготовлен мобильный комплекс противотепловых средств (МКПС) «Зима-В» (рис. 7.29) [23].

В его состав входят: наземная 1 и переносная шахтная 2 установки, расположенные в шкафу 3, в котором находятся противотепловые куртки (костюмы), пневмотрубопроводы, водофильтрующее устройство и запасные части, вагонетка-термос 4, грузоподъемное устройство 5, передвижная шахтная установка 6, автомобильный прицеп 7.

Шахтная морозильная установка и вагонетка-термос опускается на землю, поднимается и устанавливается на платформу прицепа с помощью грузоподъемного прицепа.

Конструкция и технические характеристики вагонетки-термоса, грузоподъемного устройства заимствованы из установки «Зима-А».

В случае затруднений доставки замороженных ОЭ-2 в вагонетке-термосе в горную выработку, горноспасатели используют расположенные в ней переносные теплоизолирующие контейнеры К-2, или доставленный заранее стационарный контейнер для длительного хранения ОЭ-2, параметры которого определены в работе.

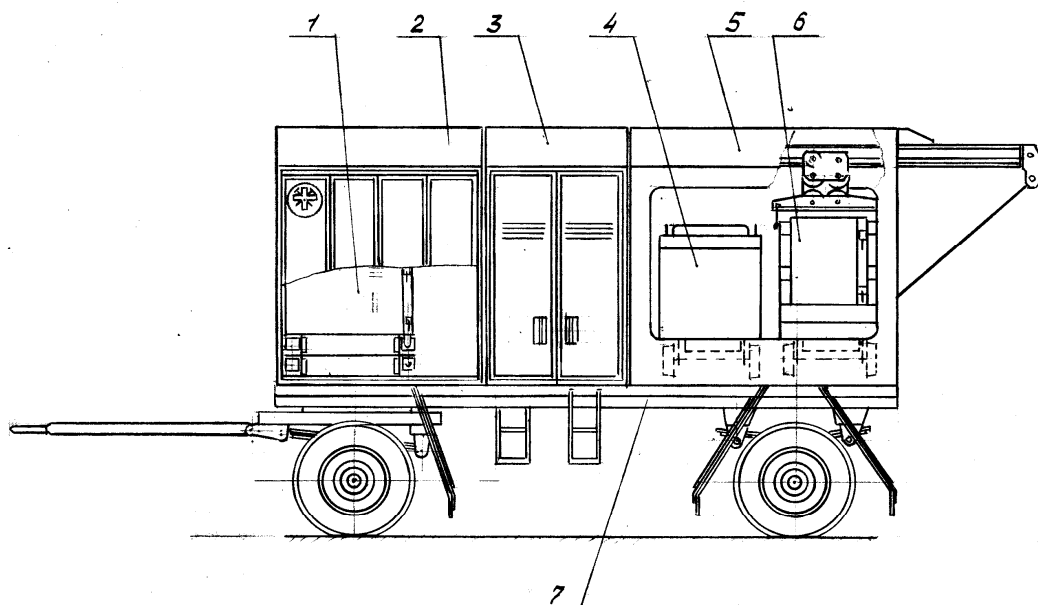


Рис. 7.29. Мобильный комплекс противотепловых средств «Зима-В»:

1— наземная воздушно-морозильная установка; 2— переносная шахтная воздушно-морозильная установка; 3— шкаф для противотепловой одежды и запасных частей; 4— вагонетка-термос; 5— грузоподъемное устройство; 6— передвижная шахтная воздушно-морозильная установка; 7— прицеп.

Доставка комплекса «Зима-В» осуществляется автомобилем марки «ЗИЛ-130».

В состав наземной воздушно-морозильной установки УВМН (рис. 7.30), изготовленной в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.2 подраздела 2.3, входят: холодильная камера 1, два турбохолодильника 2 для подачи холодного воздуха в камеру, два турбохолодильника 5 для подачи воздуха в межтрубное пространство теплообменника предохлаждения 6, рекуперативный теплообменник 7, три фильтра-влагоотделителя 3, расположенных соответственно перед теплообменником предохлаждения 6, рекуперативным теплообменником и турбодетандером, щит 4 с расположенными на нем четырьмя манометрами для измерения давления соответственно на входе в установку, перед турбохолодильниками теплообменника предохлаждения а также в камере, рамы 8, термометра 9, измеряющего температуру воздуха в камере.

В холодильной камере установки расположены 12 контейнеров (см. рис. 2.3), в которых находятся по 25 ОЭ-2.

Шахтная воздушно-морозильная установка УВМШ (рис. 7.30) выполнена на колесном ходу с учетом перемещения ее по рельсовому пути, проложенному в горных выработках шахт с шириной колеи 600 и 900 мм, состоит из следующих основных частей: холодильной камеры 2, двух турбохолодильников 4, 11, для подачи холодного воздуха соответственно в камеру и в межтрубную полость теплообменника предохлаждения 14, трех фильтров-

влажнотделителей 6, 7, 9, расположенных перед каждым турбохолодильником, между теплообменниками предохлаждения 14 и рекуперации 15 по ходу движения сжатого воздуха, трех кранов 5, 8, 12, двух термометров 1,3 для измерения температуры соответственно в камере и на входе в установку, щита 10 с четырьмя манометрами для измерения давления на входе в установку, перед детандерами теплообменника предохлаждения и морозильной камерой, а также непосредственно в ней.

В холодильную камеру установки расположили 7 контейнеров, в которых находились по 25 ОЭ-2.

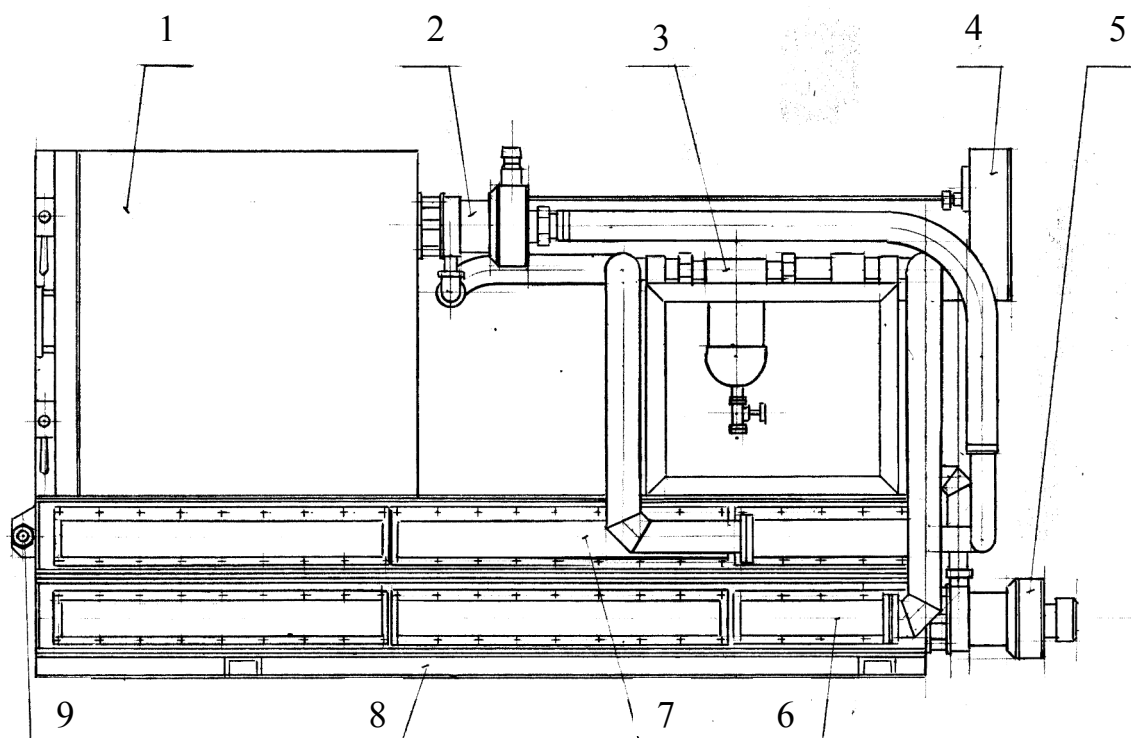


Рис. 7.29. Наземная морозильная установка УВМН:

1— холодильная камера; 2, 5 — турбохолодильники;  
3 — фильтр-влажнотделитель; 4— щит для манометров;  
6— теплообменник предохлаждения; 7— рекуперативный  
теплообменник; 8— рама; 9— термометр.



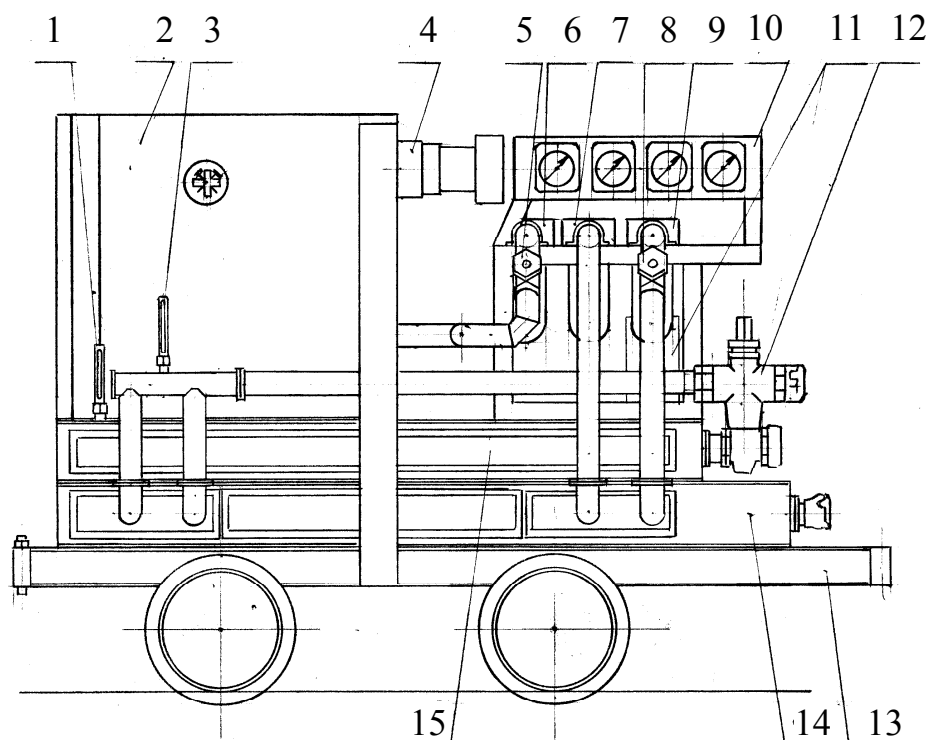


Рис. 7.30. Шахтная воздушно-морозильная установка УВМШ:

1, 3 – термометры; 2 – холодильная камера; 4, 11 – турбохолодильники; 5, 8, 12 – краны; 6, 7, 9 – Фильтры-влагоотделители; 10 – щит с манометрами; 13 – рама; 14 – теплообменникпредохлаждения; 15 – рекуперативный теплообменник.

Переносная шахтная воздушно-морозильная установка УПМШ (рис. 7.31) состоит из следующих основных частей: холодильной камеры 14, контейнеров 13 с охлаждающими элементами ОЭ-2, восьми вихревых труб 3, эжектора 5, коллектора 6, теплоизолирующей двери 7 и фильтра-влагоотделителя (на рисунке не показан).

Холодильная камера представляет собой конструкцию коробчатого типа, внешняя оболочка 9 которой выполнена из стального, внутренняя 11 – из алюминиевого листов, а пространство между ними заполнено теплоизолирующим слоем 10 из полистирола ПСВ-1 толщиной 0,08 м. Горизонтальными перегородками 1, 2 камера разделена на три части: нижняя – для размещения двух контейнеров с ОЭ-2; средняя – вихревых труб и эжектора 5, верхняя – коллектора 6, по которому из вихревых труб горячий поток воздуха направляется в сопло эжектора. Холодный воздух из нижней части камеры поступает к вихревым трубам, охлаждает их и через сопло эжектора выходит в атмосферу.

В двух контейнерах камеры расположены по 26 ОЭ-2 (всего 52 ед.), которые после замораживания помещаются в теплоизолирующий контейнер К-2 для обеспечения хладоносителя трех противотепловых курток ТК-50.

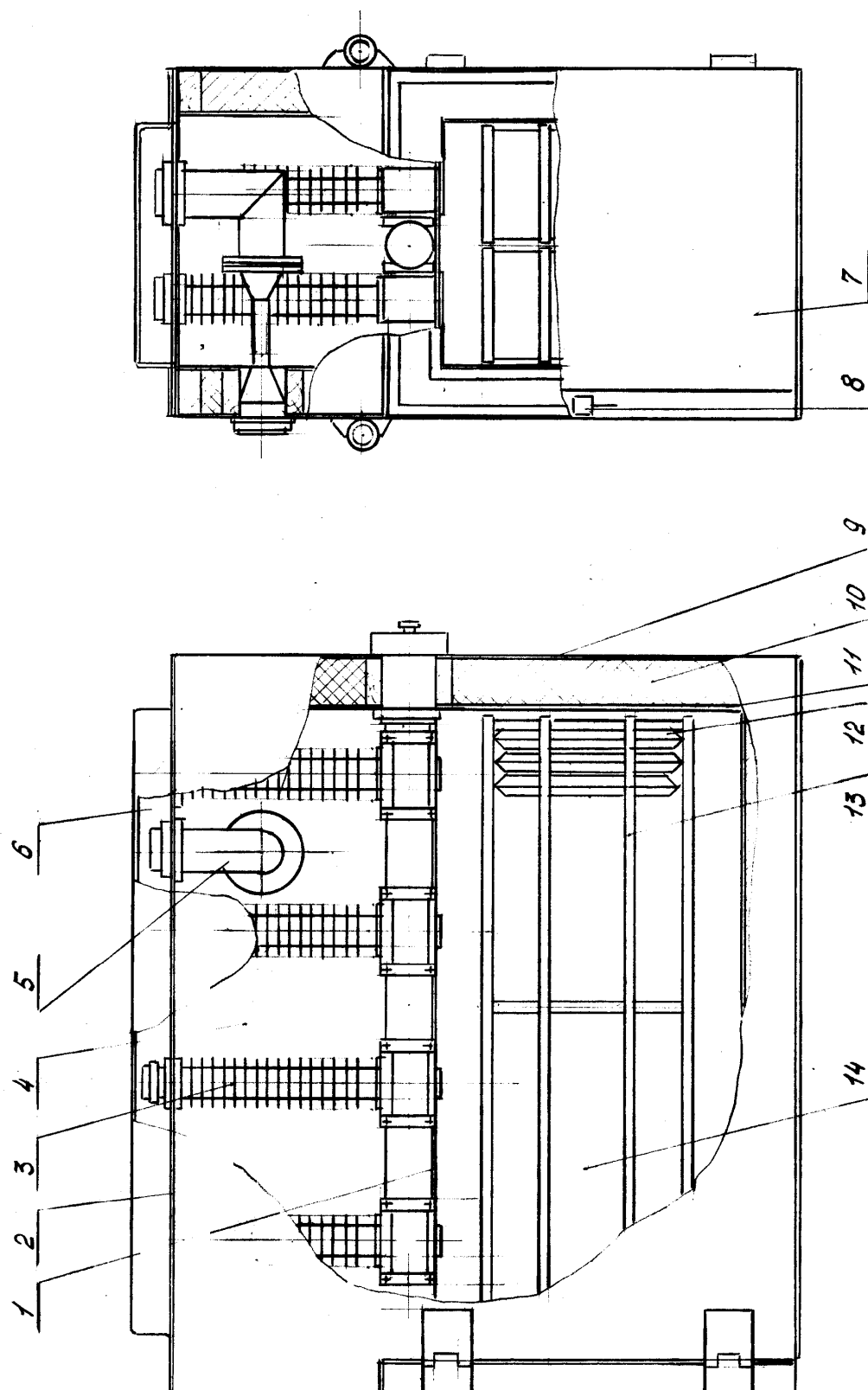


Рис. 7.31. Переносная шахтная воздушно-морозильная установка УПВШ:

1,2 – горизонтальные перегородки; 3 – вихревая труба; 4 – камера охлаждения вихревой трубы; 5 – эжектор; 6 – коллектор; 7 – теплоизолирующая дверь; 8 – уплотняющее устройство; 9 – внешняя оболочка; 10 – теплоизолирующий слой; 11 – внутренняя оболочка; 12 – охлаждающий элемент; 13 – контейнер; 14 – холодильная камера

Шахтные испытания были проведены на шахте им. В.И. Ленина ГП «Артемуголь». На поверхности шахты проведены испытания наземной и передвижной шахтной установок, а непосредственно в горной выработке – передвижной и переносной установок.

Стационарная компрессорная станция шахты обеспечивает подачу в подземную пневмосеть воздуха в количестве 220 м<sup>3</sup>/мин при давлении 0,7 МПа.

В процессе проведения испытаний фиксировались следующие данные: температура воздуха на поверхности и в горной выработке ( $t_0$ ), начальная температура ( $t_H$ ), расход ( $Q_H$ ) и давление ( $P_H$ ) сжатого воздуха, на выходе из компрессорной станции и из пневмосети в выработку, температура ( $t_{жс}$ ) и расход воды ( $Q_{жс}$ ), поступающей в водофильтрующее устройство, диаметр и длина пневмотрубопроводов, температура на входе в детандеры турбохолодильников ( $t_D$ ) и на входе в холодильные камеры ( $t_{BX}$ ), время замораживания ОЭ-2 определялось при достижении ими температуры минус 10 °С с использованием предохладения воздуха с помощью турбохолодильников в первом испытании и водофильтрующего устройства – во втором.

Значения показателей при производственных испытаниях воздушно-морозильных установок приведены в табл. 7.8. На основании их анализа можно сделать следующие основные выводы:

время замораживания ОЭ-2 в передвижной шахтной установке с воздушным предохладением теплообменника отличается от времени их замораживания, полученное по номограмме (см. рис. 7.28) при одинаковых значениях температур окружающей среды, ОЭ-2, в холодильной камере и перед турбохолодильниками, не более, чем на 5 %, что подтверждает достоверность вышеприведенных результатов теоретических и экспериментальных исследований; время замораживания ОЭ-2 с водяным предохладением теплообменника примерно в 1,6 раза меньше, чем с воздушным при использовании турбохолодильников; производительность наземной установки примерно в 1,4 раза выше, чем передвижной шахтной установки, используемой на поверхности шахты при одинаковой температуре окружающей среды, расходе сжатого воздуха в два раза больше и воздушном предохладении теплообменников; максимальная и средняя производительность соответственно наземной и шахтной передвижной шахтных установок при воздушном предохладении теплообменников практически обеспечивается, при водяном – она в 1,4 и 1,3 раза выше, чем максимальная, а производительность передвижной шахтной установки – не менее 100 ОЭ-2 в час.

Таблица 7.8

Результаты испытаний воздушно-морозильных установок в производственных условиях

Тип установки, серия наблюдений	Температура окружающей среды, $t_0$ , °C	Параметры сжатого воздуха			Параметры воды		Параметры трубопровода		Парам. возд. перед турбодетандером		Температура на входе в холодильную камеру, $t_{вх}$ , °C	Время замораживания. ОЭ-2, ч (ОЭ-2 в час)	
		$t_H$ , °C	$Q_H$ , м³/с	$P_H$ , МПа	$t_{ж}$ , °C	$Q_{ж}$ , м³/ч	$L$ , м	$D \cdot 10^{-2}$ , м	$t_d$ , °C	$P_d$ , МПа		воздушное предохл.	водяное предохл.
1. УВМН 1.1 Первая	28,2	81,3	0,41	0,55	—	—	80	7,7	15,4	0,43	минус 16,2	1,60 (187)	—
1.2 Вторая	28,4	81,7	0,41	0,55	19,5	9,7	80	7,7	3,5	0,41	минус 25,3	—	1,01 (270)
2. УВМПШ 2.1 Первая	28,2	82,3	0,21	0,48	—	—	80	6,0	12,8	0,42	минус 17,1	1,29 (135)	—
2.2 Вторая	25,7	29,5	0,21	0,46	—	—	20	6,0	10,5	0,40	минус 18,5	1,15 (152)	—
2.3 Третья	25,5	30,1	0,21	0,45	22,1	6,8	20	6,0	2,7	0,39	минус 26,5	—	0,70 (250)
3. УПМПШ 3.1 Первая	26,3	29,8	0,40	0,48	—	—	20	6,0	—	—	минус 20,5	0,52 (100)	—
3.2 Вторая	26,5	28,7	0,40	0,47	—	—	20	6,0	—	—	минус 26,3	0,49 (106)	—

При одинаковых температурах окружающей среды время замораживания ОЭ-2 в наземной установке можно определить, увеличив время их замораживания в передвижной шахтной установке в 1,24 раза по номограмме, приведенной на рис. 7. 28.

Следует отметить, что при шахтных испытаниях воздушно-морозильные установки обеспечили высокую мобильность, небольшое время вывода на рабочий режим, широкий диапазон регулирования параметров воздуха, надежную и бесперебойную работу, таким образом выполнены полностью требования, изложенные выше.

На основании полученных результатов теоретических и данных экспериментальных исследований определены технические характеристики наземной и шахтной воздушных морозильных установок, которые приведены ниже.

## **8. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ**

### **8.1. Актуальность задачи и постановка ее решения**

Исследованиям процессов тепломассопереноса для обоснования параметров водолеяных ОЭ, переносных и передвижных теплоизолирующих контейнеров для доставки к месту ведения работ, необходимых для переоснащения ими одежды, а также средств экстренного охлаждения пострадавших при перегревании и механических травмах, уделено недостаточное внимание, в результате чего разработанные средства противотепловой защиты обладают следующими недостатками [28].

На основании анализа, приведенного выше, следует, что для ПГТО наиболее целесообразным является использование радиационно-конвективной системы охлаждения, где в качестве хладагента применяется водяной лед в пластиковых ампулах, которые размещаются во внутренних решетчатых карманах одежды, расположенных в области туловища, головы, рук и ног.

К преимуществам такой системы охлаждения, как отмечено выше, относятся: простота конструкции, высокая степень надежности (отсутствие механических устройств с движущимися деталями, узлов, работающих под давлением); безвредность хладагента, его безопасность в пожарном и доступность в экономическом отношении, а также возможность длительного хранения в морозильных камерах в подразделениях ГВГСС в режиме ожидания выезда на аварию; простота и удобство в эксплуатации; возможность создания различных унифицированных модификаций ПГТО (костюмы, куртки, жилеты).

Основными требованиями при выборе конструкции водолеяного аккумулятора холода (охлаждающего элемента – ОЭ) являются: минимальные масса и затраты на изготовление, максимальная надежность и удобство в эксплуатации, а при выборе материала для него: высокие физико-механические характеристики и термические свойства, не токсичность, изготовление и широкое применение в Украине.

На основании анализа различных вариантов конструктивных решений с учетом вышеприведенных требований следует, что наиболее приемлемым использованием аккумулятора холода является водолеяной охлаждающий элемент, именуемый в дальнейшем ОЭ-2, приведенный на рис. 8.1, с технической характеристикой (табл.8.1).

По сравнению с другими хладагентами водолеяные ОЭ-2 обладают существенными преимуществами, однако, выполненные из полиэтиленовой пленки толщиной 0,15 мм, при их двух-трех кратном замораживании в камере с температурой минус 60 °С установки «Зима-А» они выходят из строя, поэтому принято, что после разового применения они не пригодны для дальнейшего использования. Экспериментально установлено, что при их замораживании в камерах установок «Норд» и «Зима-В» с температурой минус

(15...20) °С количество повторных применений в зависимости от плотности пленки равно от 12 до 15 раз, после чего происходит разрыв в области верхних горизонтальных швов. В связи с этим, каждый год подразделения ГВГСС приобретают от 30 до 40 тыс. шт. ОЭ-2, стоимость которых составляет сотни тыс. грн.

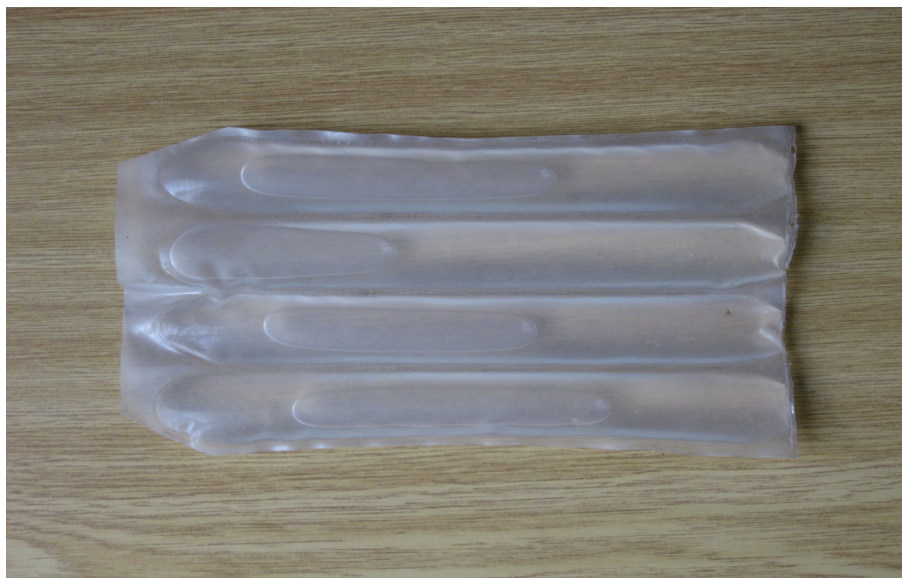


Рис. 8.1. Водоледающий охлаждающий элемент ОЭ-2

Таблица 8.1

Техническая характеристика ОЭ-2

Наименование показателя	Значение показателя
Запас холода при начальной температуре минус 10 °С, кДж, не менее	68
Габаритные размеры, мм, не более	212x93x20
Масса, кг, не более	0,175

Основные размеры ОЭ-2 (длина, ширина и высота) выбраны из условия их размещения в полиэтиленовых решетчатых карманах пододежного пространства индивидуальных средств противогазотепловой защиты горноспасателей. Внутренние ребра создают гибкость и удобство при их эксплуатации в замороженном виде (повороты, наклоны туловища, приседания горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ), наружные – обеспечивают герметичность оболочек крайних секций.

Изготовление таких ОЭ-2 не вызывает затруднений, т.к. для этого необходимы простые прессформы с регулируемой температурой для сварки швов при минимальных затратах на электроэнергию, а поэтому освоен их серийный их выпуск. Максимальная надежность использования должна обеспечиваться за счет выбора материала и толщины ОЭ-2, обоснование которых приведено ниже.

Для материала ОЭ-2 вышеприведенным требованиям максимально отвечают полиолефины – высокомолекулярные углеводороды алифатического ряда, получаемые полимеризацией соответствующих олефинов, в которых наблюдается удачное и редкое сочетание ряда ценных технических свойств, таких как высокая механическая прочность и химическая стойкость, исключительные диэлектрические показатели, низкие газо- и влагопроницаемость, плотность.

Для доставки замороженных ОЭ-2 к месту ведения работ, хранения и переоснащения противотепловой одежды до настоящего времени использовали теплоизолирующие контейнеры К-1 (рис. 8.2), с технической характеристикой (табл. 8.2), внутренняя часть которого выполнена из вспененного полистирола, наружная – стеклопластика. Переносили его вручную или на спине. Во втором случае респиратор горноспасатели располагали спереди себя (рис 8.3).

В связи с технологической сложностью изготовления (рис. 8.4) и вредностью химических компонентов, большой массой и стоимостью, а также неудобством при переносе контейнера К-1 на спине из-за жесткой его оболочки и респиратора спереди себя, предложен контейнер-сумка, состоящий из трех слоев: наружный из винилискожи, средний – пенополиэтилена, внутренний – сатина.

Учитывая значительное количество шахт с протяженностью горных выработок 1000 м и более, трудоемкость доставки большого количества ОЭ-2 при сложных (затяжных) авариях, предложен стационарный контейнер для их хранения, в котором в качестве теплоизолирующего слоя рекомендуется использовать полистирол.

В данных работах исследована динамика температуры ОЭ-2 в контейнерах без учета их использования в одежде, различного конструктивного исполнения при допущении, что температура одинакова по всему объему контейнера, отсутствуют данные экспериментальных исследований. При этом в стационарном контейнере размещены 12 переносных контейнеров и не рассмотрен вариант с ОЭ без них, что является наиболее оперативным способом их доставки.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка математической модели нестационарных теплообменных процессов в системе «охлаждающая одежда – переносной (передвижной) теплоизолирующий контейнер – водолеянные ОЭ» и определение времени хранения ОЭ в контейнерах.



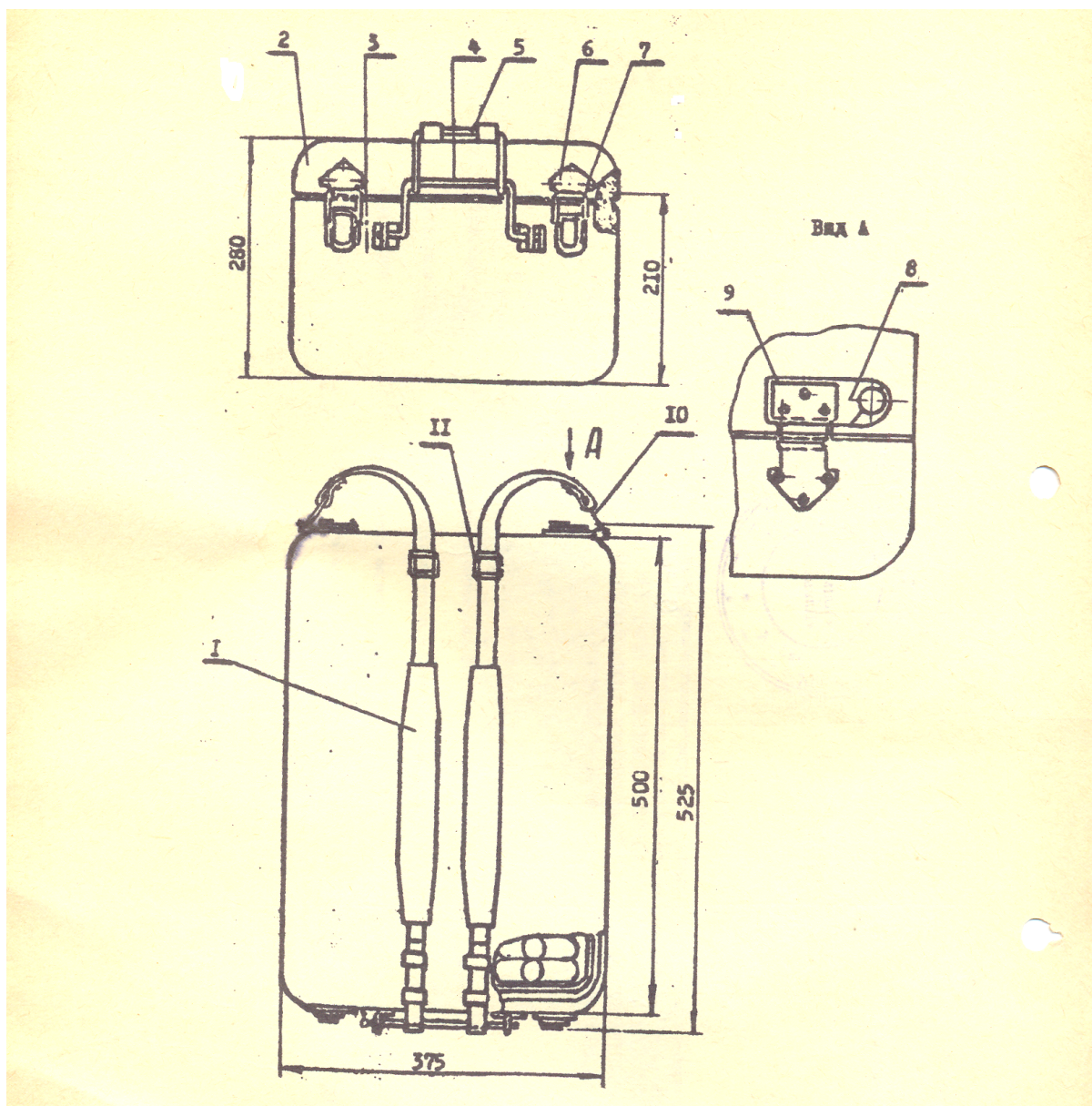


Рис. 8.2. Теплоизолирующий контейнер К-1:  
 1 – плечевые ремни; 2 – крышка; 3 – корпус; 4 – ручка; 5 – скоба;  
 6 – пружинный крючок; 7 – замок (2 шт.); 8 – ушки; 9 – резиновая прокладка; 10 – карабин, 11 – устройства для регулирования длины ремней.

Таблица 8.2

## Техническая характеристика контейнера К-1

Наименование показателя	Значение показателя
Количество помещаемых ОЭ-2, шт., не менее	80
Масса без ОЭ-2, кг, не более	5
Масса с ОЭ, кг, не более	20
Габаритные размеры, мм, не более	
длина	530
ширина	275
высота	375
Срок службы, год, не менее	5

Недостатком использования водолеяного охлаждения в КЭОП является необходимость иметь установки для замораживания ОЭ-2, средства для их доставки к месту ведения работ и хранения (теплоизолирующие контейнеры), костюмы с транспортной сумкой, что приводит к большим материальным затратам, а также недостаточная эффективность использования ОЭ-2 для оказания помощи пострадавшим, том числе при механических травмах.

Устройства для локального охлаждения участков тела человека использовались в течение многих лет. Традиционно эти устройства являлись вариантами хорошо известного пузыря со льдом, который представляет собой просто лед или замороженную смесь воды со спиртом, содержащиеся в водонепроницаемом мешке или завернутые в полотенце. В дальнейшем эти охлаждающие устройства были усовершенствованы, изготавливались емкости многократного пользования, которые содержат запас холодного материала в отдельных отделениях. Предприняты меры сделать охлаждающее устройство более гибким в местах соединений между отделениями даже тогда, когда находящийся внутри материал находится в замороженном состоянии. Это привело к использованию для охлаждения разных гидрофильных гелей, которые содержат большое количество воды и сохраняют эластичность в замороженном состоянии.

Примером успешного применения гелей является создания эластичного охлаждающего устройства, в котором гидрофильный гель, содержащий большое количество воды, нанесен на инертную эластичную основу и при замораживании он сохраняет эластичность. При создании охлаждающего устройства большое количество таких слоев, состоящих из геля и основы, могут наслаиваться один на другой и упаковывают внутри эластичной мембраны, непроницаемой для жидкости.



Рис 8.3. Расположение теплоизолирующего контейнера К-1 при использовании респиратора



Рис. 8.4. Прессформа для изготовления контейнера К-1



Каждое из этих устройств имеет отдельную охлаждающую поверхность, которую размещают против поверхности тела пострадавшего, нуждающейся в охлаждении, или несколько поверхностей из того же материала и толщины, каждая из которых обеспечивает одинаковую степень охлаждения. Поэтому при применении такого устройства у пользователя не оставалось свободы выбора среди всех имеющихся средств охлаждения, поскольку аппликации на различные части тела для разных целей могли бы явиться причиной того, что в каждом отдельном случае была бы желательна не одна и та же степень охлаждения.

В этом патенте предложено охлаждающее устройство, состоящее, как минимум, из одного слоя материала, сохраняющего холод, герметизированного внутри емкости, которая имеет две эластичные стенки из термопласта, изолированные по всему их периметру от поступления тепла, причем одна из указанных стенок выполнена из воздухопроницаемой, а вторая – из воздухо непроницаемой пленок. Охлаждающее устройство приобретает форму в замороженном состоянии, соответствующее различным геометрическим формам. По выбору такое устройство включает специальные приспособления для закрепления его на анатомической области тела пострадавшего, где его необходимо использовать.

В качестве предпочтительного варианта предусмотрено плоское, удлиненное прямоугольное охлаждающее устройство, состоящее из множества слоев гидрофильного геля, при этом каждый из таких слоев усилен эластичной основой и отделен от каждого другого слоя эластичной пленкой, которая представляет собой термопласт. По всему периметру устройства выполнен шов способом термосварки.

Одним из наиболее предпочтительных приспособлений для применения устройства являются два противоположных его конца, выходящие на небольшое расстояние за пределы шва с круглыми отверстиями, через которые проходит широкая эластичная лента, превышающая диаметр отверстий. Разница в размере между шириной эластичной ленты и диаметром отверстия обуславливает деформацию ленты при ее протягивании через отверстие и избежание проскальзывания ленты через них без приложения значительного усилия для преодоления трения. Таким образом, постоянно регулируют длину ленты между отверстиями.

Устройство хранят в замороженном виде в морозильном отделении холодильника или в камере морозильной установки до тех пор, пока не возникнет необходимость в его использовании, обратив его более холодную стенку к поверхности тела, нуждающейся в охлаждении. Если эта стенка слишком холодная, то устройство можно согнуть в противоположном направлении, что позволит разместить «более теплую» сторону на поверхности тела.

Приведенные устройства являются многократного использования, однако они также требуют применения морозильных установок, время их охлаждающего действия ограничено при хранении в условиях повышенных температур воздуха.

Альтернативой приведенным выше охлаждающим устройствам, а также водоледяным аккумуляторам холода, являются пакеты, в которых холод выделяется в результате эндотермической реакции с поглощением тепла при смешивании некоторых солей (карбамида, нитрата аммония, хлорида: кальция, аммония, калия и т.д.) с водой.

Охлаждающие пакеты с химическими ингредиентами можно содержать в любых условиях, для них не требуется специального оснащения для хранения и транспортирования, они постоянно готовы к применению, сохраняют охлаждающие свойства в течение длительного времени хранения.

Наиболее полно этот способ получения холода и конструктивные исполнения с описанием состава, соотношения массы химических ингредиентов и воды изложено в патенте на охлаждающее устройство, которое рассмотрим более подробно.

Изобретение представляет собой устройство, которое включает компоненты охлаждающей смеси, помещенные в емкость с тремя отделениями, первое содержит воду, во втором и третьем отделениях находятся соли, эндотермически растворимые в воде. При этом является предпочтительным, чтобы во втором отделении содержался гидратизированный карбонат натрия преимущественно в виде прутков или блоков, в третьем отделении – находился нитрат аммония в виде макрочастиц или драже. Поскольку второе и третье отделение содержат гидратизированный карбонат натрия и нитрат аммония, то соотношение их масс должно составлять 7:4, а лучше – 143:80.

Количество воды должно составлять 5-15 % от общей массы гидратизированного карбоната натрия и нитрата аммония, а лучше – 10 % от общей массы. Первое отделение с водой представляет собой легко разрывающийся пластиковый мешок, который находится внутри одного из других отделений, а содержимое всех трех отделений могло смешиваться между собой, не будучи в самой емкости при ее разгерметизации.

Усовершенствованный вариант данного устройства: второе и третье отделения объединены, если эти соли не реагируют между собой при отсутствии воды. Например, частицы одной соли (нитрат аммония) могут быть покрыты (как и в случае с некоторыми материалами, используемыми в качестве удобрений) материалом, который предотвращает поступление влаги, но который позволяет соли растворяться в воде в первом отделении при контакте между ними.

Другие подходящие гидратизированные соли включают  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaHPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , а также материалы, содержащие мочевины. Состав, которому отдается предпочтение, должен включать 125 частей мочевины, 145 частей нитрата аммония и 140 – воды.

При промышленном изготовлении охлаждающего устройства необходимо хранить оба химических продукта в сухом виде, отдельно один от другого до момента использования. Установлено, что при нахождении продуктов в отдельных пластиковых пакетах-саше бывает трудно достичь адекватного смешивания для обеспечения протекания эффективной реакции. Отмечается, что для устранения этого эффекта при добавлении воды в количестве

от 5 до 15 % (преимущественно 10 %) от общей массы двух химических веществ смешивание происходит при легком потряхивании пакетов-саше, а добавление воды лишь слегка уменьшает охлаждающее действие, но оно считается предпочтительным для адекватного смешивания. Кроме воды можно использовать и другие водные жидкости, но не приводятся какие.

Установлено, что при использовании пропорций веществ в смесях, приведенных выше, реакция время от времени прекращается в связи с замораживанием смеси.

Однако в данных работах отсутствует информация об оптимальном составе, массе химических ингредиентов и воды, начальной температуры и данные ее изменения в водно-солевом растворе, а также на поверхности пакета. Кроме этого, приведенные выше средства являются сложными в конструктивном исполнении.

Как показали исследования, проведенные в НИИГД «Респиратор», активация российских пакетов «ТутКакТут», предназначенных для локального охлаждения пострадавшего, обеспечивает перепад температур около 13 °С с временем охлаждающего эффекта около 10 мин, что явно недостаточно для пострадавших в условиях повышенной температуры шахт.

Поэтому необходимо разработать средства для экстренного охлаждения пострадавших при перегревании и механических травмах, обладающих минимальной массой и максимальной охлаждающей способностью для условий шахтного микроклимата.

Недостаточные исследования параметров таких составных частей средств индивидуальной противотепловой защиты, как водолеяных ОЭ, теплоизолирующих контейнеров для их доставки к месту ведения работ, а также средств для оказания экстренной помощи пострадавшим при перегревании и механических травмах, приводит к значительным затратам, снижению безопасности труда и эффективности ведения работ в условиях повышенной температуры шахтного микроклимата.

Структурная блок-схема средств обеспечения противотепловой одежды и оказания помощи пострадавшим от перегрева и механических травм, раскрывающая объект и предмет исследований, приведена на рис 8.5.

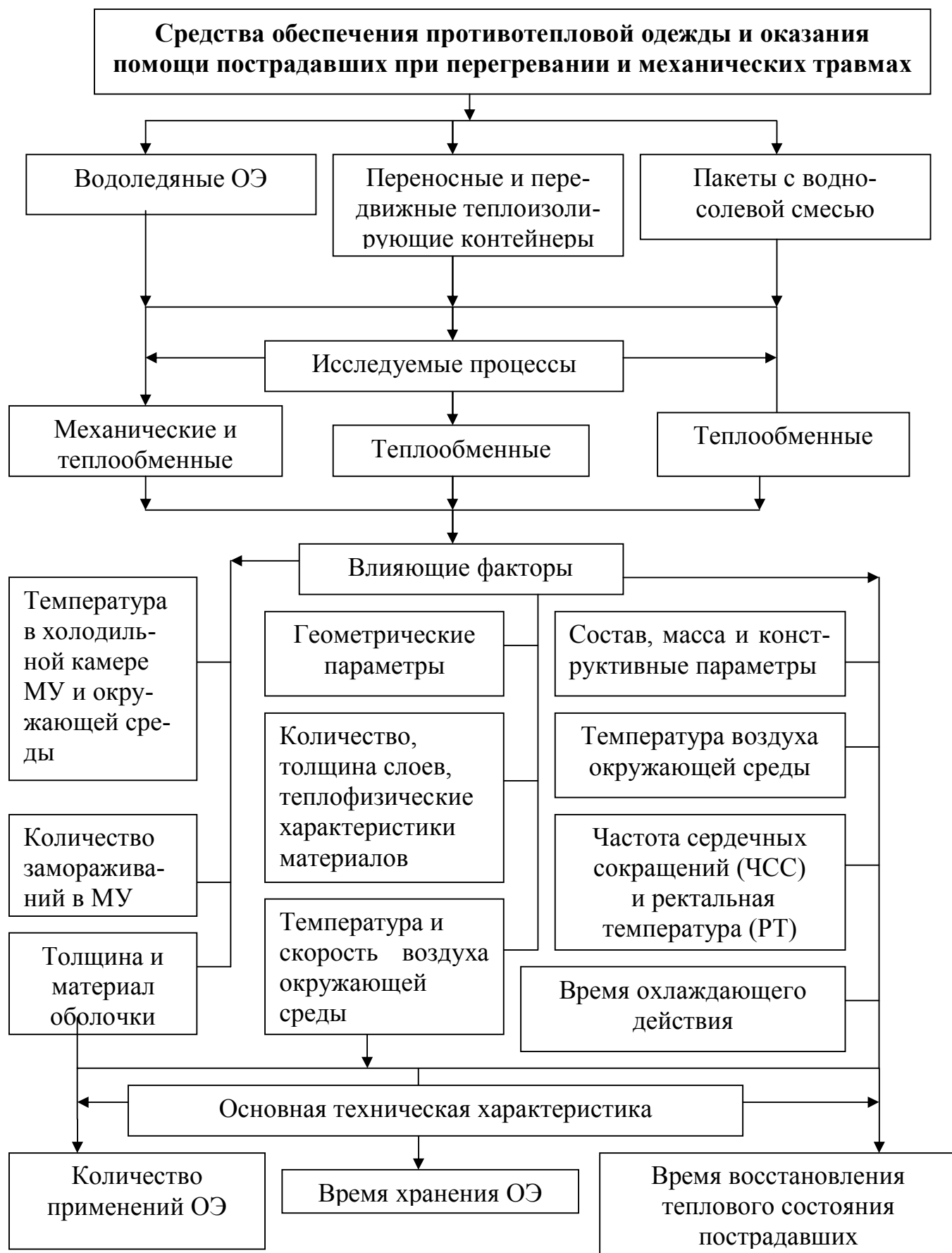


Рис. 8.5. Структурная блок-схема средств обеспечения противотепловой одежды и оказания помощи пострадавшим при перегревании и механических травмах

## 8.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОХЛАЖДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ

### 8.2.1. Исследование напряженно-деформированного состояния оболочки водолеяного охлаждающего элемента

Основные размеры ОЭ-2 (длина, ширина и толщина) выбраны из условия их размещения в полиэтиленовых решетчатых карманах пододежного пространства. Внутренние ребра обеспечивают гибкость и удобство при их эксплуатации в замороженном виде (повороты, наклоны туловища, приседания горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ), наружные – герметичность оболочек крайних секций.

На основании исследований тепломассообменных процессов в пододежном пространстве, изложенных ранее [6], получено, что толщина полиэтиленовой пленки не должна превышать  $0,7 \cdot 10^{-3}$  м, т.е.  $\delta_{\max} \leq 0,7 \cdot 10^{-3}$  м, с коэффициентом теплопроводности  $\lambda \leq 0,28$  Вт/(м·К) [6]. Нижнюю границу толщины полиэтиленовой пленки ОЭ-2, т.е.  $\delta_{\min}$ , определим при исследовании напряженного его состояния в процессе замораживания.

В результате перепада температур возникают термоупругие напряжения в оболочках и в ребрах, расположенных внутри секций и снаружи ОЭ-2, а также напряжения в оболочках за счет внутреннего давления льда при его увеличении в объеме, если весь объем оболочек заполнен водой. Последнее обстоятельство, как показали результаты экспериментальных исследований по замораживанию ОЭ-2, зачастую приводило к разгерметизации сварочных швов ребер.

Учитывая увеличение объема льда по сравнению с водой, секции ОЭ-2 не заполняются на 15 % от общего их объема, а поэтому напряжениями в оболочке от внутреннего давления можно пренебречь.

В связи с этим, определение минимальной толщины пленки ОЭ-2 сводится к исследованию ее термоупругого напряженного состояния.

Рассмотрим секцию ОЭ-2 в виде цилиндрической, наполненной жидкостью, постоянной толщины, замкнутой оболочки с координатами  $r$ ,  $\varphi$  и  $z$  (рис. 8.6) под действием теплового потока, равномерно распределенного в направлениях  $\varphi$  и  $z$ , т.е. температура  $T$  является функцией только координаты  $r$ , т.е.  $(T = f(r))$ . Задача в такой постановке является плоской задачей термоупругости и, в частности, плоской деформацией.

В данном случае – это произвольное осесимметричное тепловое поле и при установившемся поле температур, принимая ее распределение в виде [6, 28,31,32]



$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{b_0}{a_0}} \ln \frac{r}{a_0}, \quad (8.1)$$

где  $T_1, T_2$  – температуры соответственно внутренней и наружной поверхности оболочки, К.

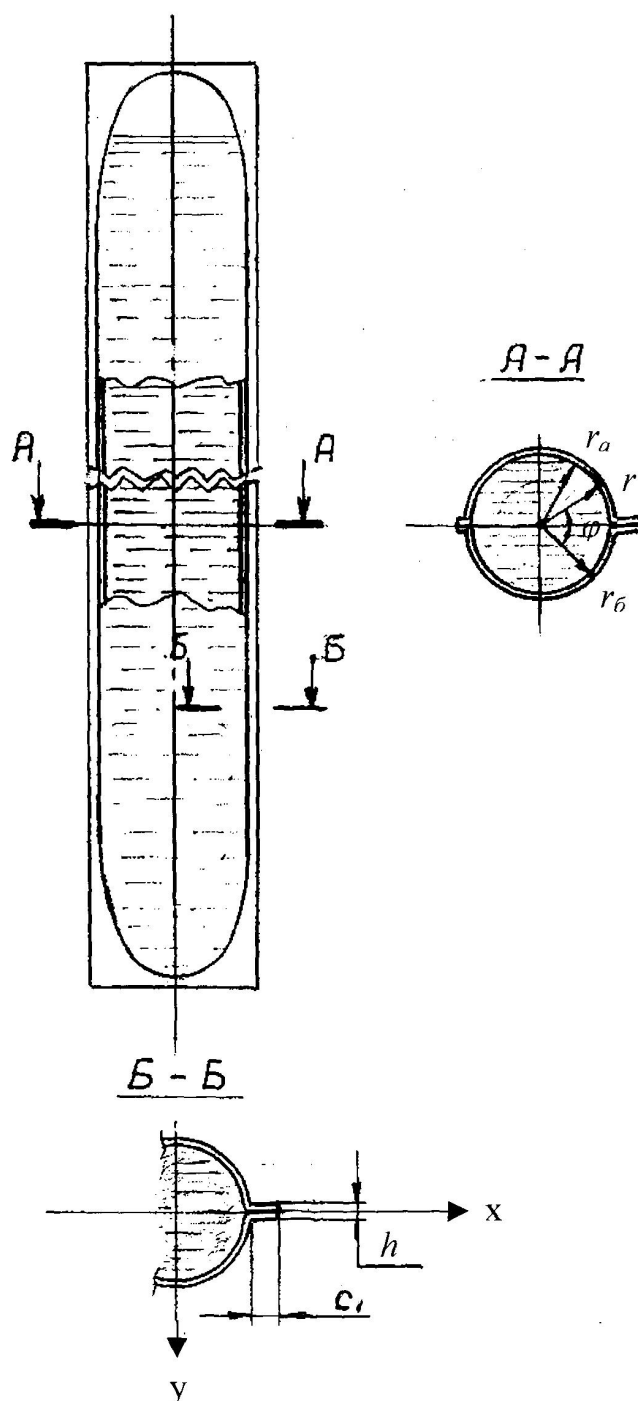


Рис. 8.6. Расчетные схемы оболочки (А-А) и наружного ребра (Б-Б) ОЭ-2

Формулы для определения напряжений имеют вид

$$\sigma_r = -c \begin{bmatrix} \ln \frac{b_0}{r} & \frac{b_0^2}{r^2} - 1 \\ \ln \frac{b_0}{a_0} & \frac{b_0^2}{a_0^2} - 1 \end{bmatrix}; \quad \sigma_\varphi = -c \begin{bmatrix} \ln \frac{b_0}{r} - 1 & \frac{b_0^2}{r^2} + 1 \\ \ln \frac{b_0}{a_0} & \frac{b_0^2}{a_0^2} - 1 \end{bmatrix}; \quad (8.2)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\varphi) - \alpha_m ET;$$

$$c = B_0 \alpha_0 (T_1 - T_2) / 2, \quad B_0 = E / (1 - \nu),$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент линейного теплового расширения материала пленки,  $K^{-1}$ ;

$a_0, b_0$  – соответственно внутренний и наружный диаметр оболочки, м;

$r$  – текущий радиус, м;

$E$  – модуль упругости материала пленки, Па;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

В виду малости касательных напряжений  $\tau_{r\varphi}$ , действующих в плоскости пленки, ими пренебрегаем.

Для охлаждающегося наружного ребра температурные напряжения имеют вид

$$\sigma_x = \sigma_{xy} = \sigma_y = 0, \quad \sigma_z = \alpha E (T_1 - T_2) \frac{chm(c_1 - x)}{chmc_1}, \quad (8.3)$$

$$m = \sqrt{\frac{2\kappa_1}{\lambda h}}, \quad x = \pm h/2, \quad h = 2\delta,$$

где  $h, c_1$  – соответственно толщина и ширина ребра, м;

$\kappa_1$  – коэффициент теплопередачи,  $Вт/(м^2 \cdot K)$ .

Напряжения для внутренних ребер, ввиду симметричности действия температур, равны нулю.

Для определения напряженного состояния оболочки и наружных ребер ОЭ-2 необходимо знать механические характеристики пленки  $E$  и  $\nu$ .

Модуль упругости для полиэтилена НД является функцией температуры и имеет значения, приведенные в табл. 8.3.

В соответствии с изменением от температуры модуля упругости согласно меняется и предел прочности  $\sigma_b$ . Так как в дальнейшем при расчете и анализе напряженного состояния пленки ОЭ-2 необходимо использовать аналитические зависимости предела прочности и модуля упругости от температуры, то аппроксимируя реальные значения этих величин, получим следующие

щий функциональный их вид (рис. 8.7 и 8.8).

Таблица 8.3

Зависимость модуля упругости полиэтилена НД от температуры

Модуль упругости, $E$ , МПа	28,1	26,7	23,2	19,2	13,6	7,4	3,1	2,2	0,97
Температура, °C	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	50

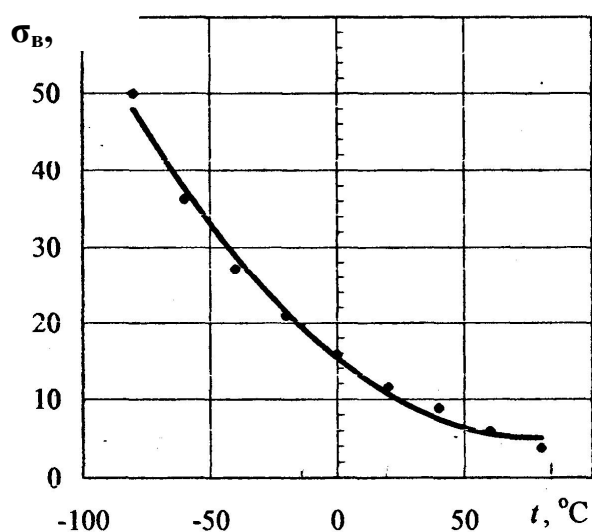


Рис. 8.7. Зависимость предела прочности полиэтилена НД от температуры

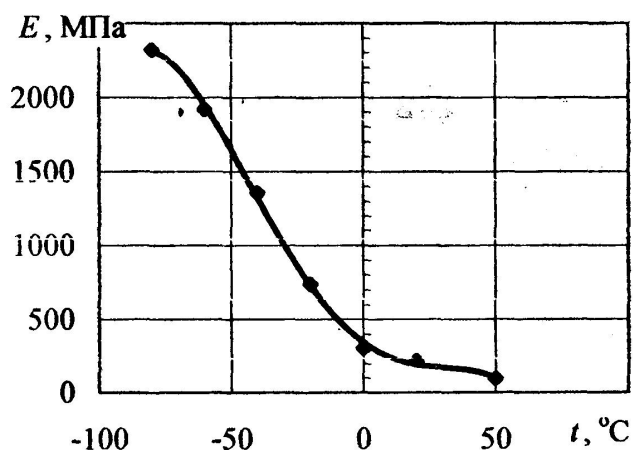


Рис. 8.8. Зависимость модуля упругости полиэтилена НД от температуры:

◆ – литературные данные;  
— – аппроксимирующая зависимость

$$E = -4 \cdot 10^{-5} T^4 - 9 \cdot 10^{-4} T^3 + 0,328 T^2 - 13,12 T + 347,8 \quad (R = 0,9994). \quad (8.4)$$

$$\sigma_B = 0,17 \cdot 10^{-2} T^2 - 0,2684 T + 15,406 \quad (R = 0,9962). \quad (8.5)$$

По разработанному алгоритму и составленной программе проведена

серия расчетов напряженного состояния оболочки и наружного ребра ОЭ-2. При этом исходные данные для варьируемых параметров принимались следующими: толщина  $\delta$  выпускаемых в Украине полиэтиленовых пленок составляет (0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0) $10^{-4}$  м, максимально возможные значения температур при замораживании ОЭ-2  $T_2 = 213$  К ( $-60$  °С),  $T_1 = 298$  К (25 °С);  $T_2 = 213$  К ( $-60$  °С),  $T_1 = 263$  К ( $-10$  °С) в камере морозильной установки «Зима-А»;  $T_2 = 253$  К ( $-20$  °С),  $T_1 = 298$  К (25 °С);  $T_2 = 253$  К ( $-20$  °С),  $T_1 = 263$  К ( $-10$  °С) в камере морозильной установки УМШ;  $\alpha = 2 \cdot 10^{-4}$  К $^{-1}$ ;  $\kappa_1 = 4,42$  Вт/(м $^2$ ·К);  $\nu = 0,4$  (определен при экспериментальных исследованиях) Принятое значение  $T_1 = 263$  К ( $-10$  °С) – необходимая температура замороженных ОЭ-2.

Предварительные результаты показали, что максимальными напряжениями в оболочке являются напряжения  $\sigma_z$ , причем они возникают на наружной ее поверхности, в ребре – на наружной и внутренней поверхностях, где они равны, но противоположные по знаку. Напряжения  $\sigma_r$  в оболочке на несколько порядков ниже, чем  $\sigma_z$ , поэтому ими можно пренебречь, а в ребре напряжения  $\sigma_z$  практически не зависят от его ширины.

Согласно уравнению (8.2) напряжения  $\sigma_z$  в оболочке зависят от распределения температуры  $T$  по радиусу, перепада температур ( $T_1 - T_2$ ) и радиуса  $r$  (толщины оболочки  $\delta$ ). С другой стороны, от температуры зависит модуль упругости  $E$ , т.е. задача является многофакторной, поэтому для определения зависимости максимальных напряжений  $\sigma_z$  от вышеприведенных параметров будем фиксировать один из них, а остальные варьировать. При этом считаем, что коэффициент Пуассона  $\nu$  практически не зависит от температуры.

По результатам вышеприведенных исследований получены зависимости напряжений  $\sigma_z$  в оболочке от радиуса, различных значений толщины при фиксированном максимальном перепаде температуры (рис. 8.9); от температуры и различных значений перепада температур при фиксированной толщине (рис. 8.10); от радиуса и различных значений перепада температур при фиксированной толщине (рис. 8.11); от радиуса, различных значений перепада температур, температуры хладагентов при фиксированной толщине (рис. 8.12), а также зависимость от ширины ребра и различных перепадах температур (рис. 8.13).

Анализ приведенных результатов расчета показывает, что напряжения  $\sigma_z$ , возникающее в пленке оболочки ОЭ-2 являются в основном растягивающими, повышаются при увеличении толщины, достигая своих максимальных: и одинаковых значений на наружной ее поверхности (см. рис. 8.9); с повышением отрицательных температур увеличиваются, принимая максимальные свои значения при максимальных перепадах температур (см. рис. 8.10), при незначительных перепадах температур переходят в линейную зависимость (см. рис. 8.11, обозначение 4); принимают максимальное значение при замораживании воды азотом ( $t_2 = -60$  °С), а минимальное –

воздухом ( $t_2 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); промежуточные значения принимают при замораживании ОЭ-2 жидким аммиаком или диоксидом углерода (см. рис. 8.12). При этом максимальные значения сжимающих напряжений  $\sigma_z$  в ребре в указанных пределах изменения толщины увеличиваются при повышении перепада температуры хладагентов (рис. 8.13).

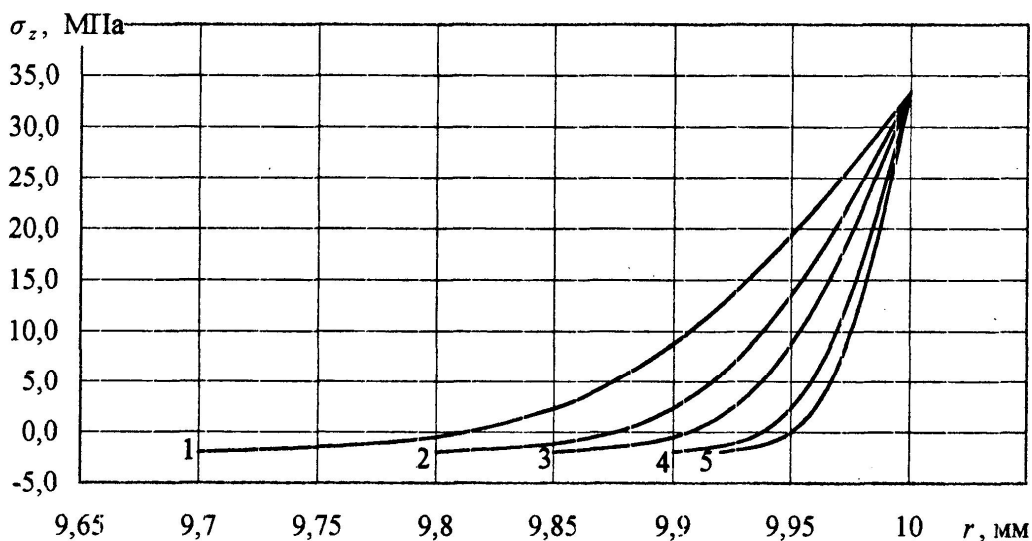


Рис. 8.9. Зависимость напряжений  $\sigma_z$  от радиуса и толщины оболочки при перепаде температур  $t_1 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2 = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

1 –  $\delta = 0,30$  мм; 2 –  $\delta = 0,20$  мм;

3 –  $\delta = 0,15$  мм; 4 –  $\delta = 0,10$  мм;

5 –  $\delta = 0,08$  мм

Получены соответствующие зависимости предела прочности  $\sigma_b$  от перепада температур при фиксированной толщине оболочки (рис. 8.10), а также в ребре (см. рис. 8.13, обозначения 1, 2 и 3,4). Во втором случае  $\sigma_b$  зависит только от температуры хладагента и принимает одинаковое значение при замораживании ОЭ-2 азотом или воздухом.

Сравнивая максимальные значения напряжений  $\sigma_b$  с соответствующими предельными значениями (см. рис. 8.14), получим, что условие прочности выполняется во всех случаях, т.е. запас прочности принимает для оболочки значения от 1,13 ( $T_1 = 298\text{ K}$ ,  $T_2 = 213\text{ K}$ ) до 1,30 ( $T_1 = 263\text{ K}$ ,  $T_2 = 213\text{ K}$ ) при замораживании азотом в установке «Зима-А» и от 4,24 ( $T_1 = 298\text{ K}$ ,  $T_2 = 253\text{ K}$ ) до 6,35 ( $T_1 = 263\text{ K}$ ,  $T_2 = 253\text{ K}$ ) при замораживании воздухом в установке УМШ, а в ребре – соответственно от 1,17 до 14,80. Причем запас прочности ОЭ-2 при замораживании его в установке «Зима-А» незначителен.

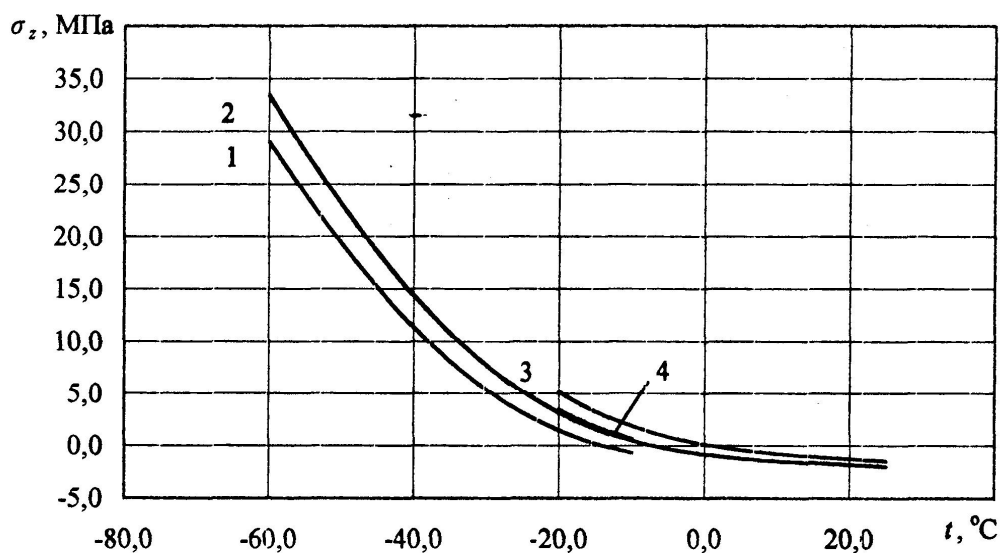


Рис. 8.10. Зависимость напряжений  $\sigma_z$  от температуры и перепада температур при фиксированной толщине оболочки  $\delta = 0,15$  мм:

1 –  $t_1 = -10$  °C;  $t_2 = -60$  °C; 2 –  $t_1 = 25$  °C;  $t_2 = -60$  °C;

3 –  $t_1 = 25$  °C;  $t_2 = -20$  °C; 4 –  $t_1 = -10$  °C;  $t_2 = -20$  °C

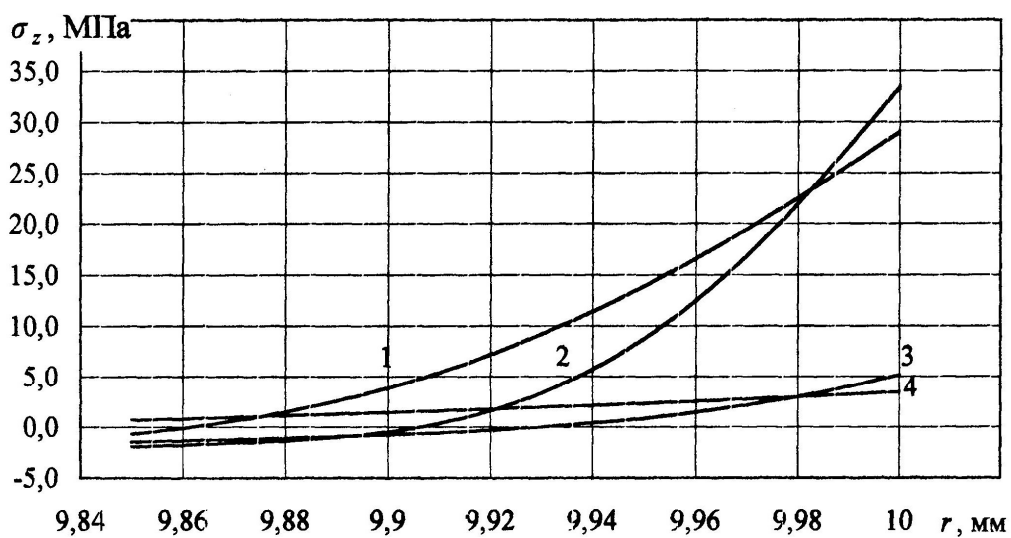


Рис. 8.11. Зависимость напряжений  $\sigma_z$  в оболочке от радиуса и перепада температур при фиксированной толщине оболочки  $\delta = 0,15$  мм:

1 –  $t_1 = -10$  °C;  $t_2 = -60$  °C; 2 –  $t_1 = 25$  °C;  $t_2 = -60$  °C;

3 –  $t_1 = 25$  °C;  $t_2 = -20$  °C; 4 –  $t_1 = -10$  °C;  $t_2 = -20$  °C

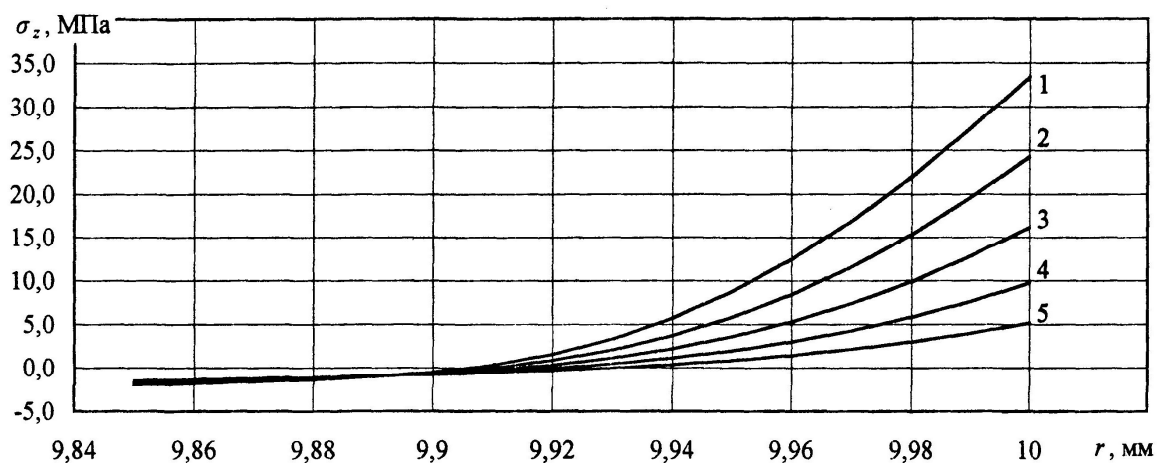


Рис. 8.12. Зависимость напряжений  $\sigma_z$  от радиуса и перепада температур при фиксированной толщине оболочки  $\delta = 0,15$  мм и  $t_1 = 25$  °C:

$$1 - t_2 = -60$$
 °C; 2 -  $t_2 = -50$  °C;

$$3 - t_2 = -40$$
 °C; 4 -  $t_2 = -30$  °C;

$$5 - t_2 = -20$$
 °C

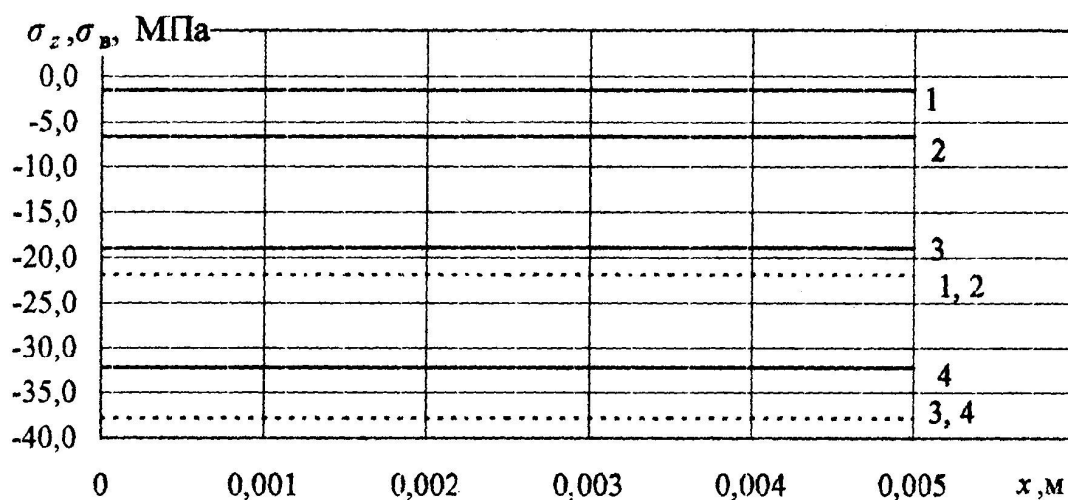


Рис. 8.13. Зависимость напряжений  $\sigma_z$  и  $\sigma_\phi$  от ширины ребра

при различных значениях перепада температур:

$$1 - t_1 = -10$$
 °C;  $t_2 = -20$  °C; 2 -  $t_1 = 25$  °C;  $t_2 = -20$  °C;

$$3 - t_1 = -10$$
 °C;  $t_2 = -60$  °C; 4 -  $t_1 = 25$  °C;  $t_2 = -60$  °C;

$$\text{—} - \sigma_z; \text{----} - \sigma_\phi \text{ 1, 2 и 3, 4}$$

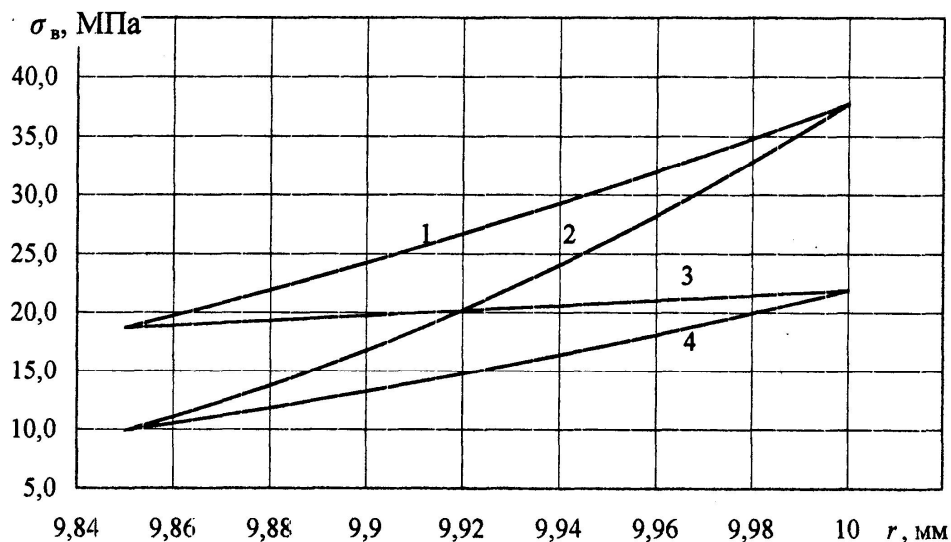


Рис. 8.14. Зависимость предела прочности  $\sigma_{\text{в}}$  от радиуса оболочки, различных значений перепада температур при фиксированной толщине  $\delta = 0,15$  мм:

1 –  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = -60^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = -60^\circ\text{C}$ ;

3 –  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = -20^\circ\text{C}$ ; 4 –  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = -20^\circ\text{C}$

Следовательно, рассматриваемые толщины пленки  $(0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0)10^{-4}$  м могут быть использованы для изготовления ОЭ-2. Однако, как показала практика, обеспечить качество сварных швов при толщине пленки  $(0,8; 1,0)10^{-4}$  м технологически невозможно, поэтому для изготовления ОЭ-2 можно использовать минимальную толщину пленки  $(0,15 \cdot 10^{-3})$  м.

Таким образом, при одноразовом замораживании ОЭ-2 выбранные конструкция, материал, толщина оболочки ОЭ-2 обеспечат надежную работу горноспасателей в экстремальных микроклиматических условиях шахт.

Однако, известно, что материалы, для которых зависимость между напряжениями и деформациями включает время, называют упруговязкими. К таким материалам относят полимеры и их композиции, сплавы, бетоны, горные породы, грунты, лед, металлы при повышенных температурах и др. Характерными для таких материалов являются их релаксационные свойства: изменение напряжений при неизменных деформациях (релаксация) и изменение деформации при постоянных напряжениях (ползучесть), которые меняются в результате снижения механических характеристик.

За основные изменения деформаций и напряжений, как правило, принимают линейную и простейшие нелинейные наследственные теории со слабосингулярными функциями влияния, содержащими параметры, которые вместе с упругими постоянными являются механическими характеристиками материала. Для определения этих характеристик упруговязких материалов по данным квазистатических опытов на ползучесть и релаксацию используют метод совмещений, который позволяет определить функцию связанной ползучести, входящую в решения упруговязких задач, полученных методом ап-



проксимаций.

Сущность метода совмещений состоит в сравнении (совмещении) экспериментальной кривой с подобной ей из семейства теоретических кривых, построенных для различных параметров функций влияния.

Для описания процессов деформирования упруговязких материалов Больцман предложил теорию наследственной вязкоупругости, построенную на основе принципа суперпозиции: «...влияния полученных в разное время деформаций (напряжений) складываются, то есть, объединяются путем непосредственного сложения».

Математическая зависимость напряжений от деформаций и, наоборот, основанная на этой гипотезе, имеет соответственно вид интегральных уравнений Вольтера [31]

$$\sigma(t) = E \left[ \varepsilon(t) - \int_0^t T(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right], \quad (8.6)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \left[ \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \right], \quad (8.7)$$

где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  - напряжение, МПа и деформация соответственно;

$T(t-\tau)$ ,  $K(t-\tau)$  - функции влияния деформации и напряжения, убывающие при возрастании  $t-\tau$ ;

$t$ ,  $\tau$  - время наблюдения и предшествующее моменту наблюдения время, с.

Физические характеристики тел, обладающих свойствами ползучести, описываются параметрами, которые должны быть инвариантами для любых процессов нагружения в стационарном температурном теле. За такие параметры в наследственной теории приняты упругие постоянные параметры функции влияния  $T(t)$  или  $K(t)$ . Эти характеристики можно получить по режимам нагружения. Проще всего параметры определить по результатам опытов на ползучесть образцов при плавном постоянном нагружении.

Для практики в большинстве случаев представляет интерес определение наибольших напряжений, при которых деформации ползучести ограничены.

При  $\sigma(t) = \text{const}$  из соотношения (8.7) получено уравнение ползучести

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 + \int_0^t K(\tau) d\tau \right], \quad (8.8)$$

при дифференцировании которого по  $t$ , находим

$$K(t) = \frac{E}{\sigma} \frac{d\varepsilon(t)}{dt}. \quad (8.9)$$

Функция влияния  $K(t)$  пропорциональна функции скорости ползучести и обладает свойством сингулярности, то есть  $K(0) = \infty$ , причем согласно уравнению (8.8) интеграл от  $K(\tau)$  является конечной величиной. Поэтому такие функции называют слабосингулярными, функциями со слабой особенностью или функциями скорости ползучести.

Для индивидуальной противогазотепловой защиты в качестве аккумулятора холода, как отмечено выше, наиболее целесообразно использовать водолеяные ОЭ.

В связи с интенсивностью применения противотепловой одежды, актуальным является увеличение срока эксплуатации ОЭ, изготовленных из серийно выпускаемой в Украине полиэтиленовой пленки толщиной 0,2 мм и 0,4 мм, а также поливинилхлоридной пленки при их замораживании в вышеприведенных морозильных установках с температурой в холодильной камере 253 К (минус 20 °С) и 213 К (минус 60 °С).

Математически функциональная зависимость для определения количества использования водолеяных ОЭ,  $n_u$ , раз, имеет следующий вид

$$n_u = f(\sigma_{\max} \leq \sigma_B); \quad (8.10)$$

$$\sigma_{\max} = f_1(\delta, \tilde{E}, \tilde{\nu}, T_B, T_0, N_3, \alpha_0, \tau, t),$$

где  $\sigma_{\max}, \sigma_B$  — максимальные и предельные значения напряжений, возникающие в оболочке ОЭ, МПа, соответственно;

$\tilde{E}, \tilde{\nu}$  — модуль упругости, МПа и коэффициент Пуассона, определяемые в процессе ползучести оболочки ОЭ;

$T_B, T_0$  — температура воздуха окружающей среды и начальная температура ОЭ (температура замораживания), К соответственно;

$N_3$  — количество замораживаний ОЭ, раз.

Общее напряжение, возникающее в полиэтиленовой или поливинилхлоридной пленках при многократном замораживании ОЭ, состоит из суммы напряжений, определенных по зависимостям (8.1-8.3), а также с учетом явления ползучести. Определить первую составляющую напряжений не представляет трудностей, поэтому остановимся на исследовании второй его части.

Для материалов, обладающих ползучестью, можно указать некоторую область напряжений, в пределах которой деформация ползучести, накопленная в течение заданного времени, пропорциональна приложенному напряжению (область линейной ползучести). При тех напряжениях и периодах времени, которые допускаются в качестве рабочих, скорость ползучести убывает

во времени. Возрастание скорости приводит к разрушению материала и, как правило, недопустимо. Поэтому практический интерес представляет изучение динамики ползучести на первом участке.

В первый момент времени приложения нагрузки, скорость ползучести оказывается чрезвычайно большой, точное измерение ее затруднено вследствие динамических эффектов, связанных с нагружающим устройством и измерительной аппаратурой. Поэтому используют законы ползучести, для которых ее скорость будет экспоненциальной функцией дробного порядка (функция Ю.Н. Работнова) [28,32]

$$\mathcal{E}_\alpha(-\beta, t) = t^{-\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \beta^n t^{n(1-\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1-\alpha)]}, \quad (0 < \alpha < 1, \beta > 0), \quad (8.11)$$

где  $\Gamma$  – гамма-функция, ее свойства приведены в работе;

$\alpha, \beta$  – постоянные ползучести, определяемые по результатам экспериментальных исследований.

Функция (8.11) является ядром оператора  $\mathcal{E}_\alpha^*(\beta)$ , который выражается через оператор Абеля  $I_\alpha^*$

$$\frac{1}{1 - \beta I_\alpha^*} = 1 + \beta \mathcal{E}_\alpha^*(\beta), \quad (8.12)$$

с ядром

$$I_\alpha = \frac{t^2}{\Gamma(1-\alpha)}. \quad (8.13)$$

Свойства изотропного упругого тела, каким является полиэтиленовая или поливинилхлоридная пленки ОЭ, характеризуются двумя упругими параметрами (модулем упругости  $E$ , МПа, и коэффициентом Пуассона  $\nu$ ), которые заменяют линейными операторами

$$\tilde{E} = \tilde{E}(1 - \Gamma^*), \quad \tilde{\nu} = \nu(1 + N^*), \quad (8.14)$$

где  $\Gamma^*$  и  $N^*$  принадлежат к одному классу разрешающих или резольвентных операторов Вольтерра и представляют собой дробно-экспоненциальные функции с одинаковым индексом

$$\Gamma^* = \chi \mathcal{E}_\alpha^*(-\beta - \chi), \quad N^* = \frac{1 - 2\nu}{2\nu} \Gamma^*, \quad (8.15)$$

где  $\chi$  – постоянная ползучести, определяемая экспериментальным путем по зависимости

$$\chi = (E - E_{\infty}) / (E\tau^{1-\alpha}), \quad (8.16)$$

$E_{\infty}$  – установившийся модуль нормальной упругости, МПа.  
Модуль упругости определим из выражения

$$\frac{\tilde{E}}{1 - 2\tilde{\nu}} = \frac{E}{1 - \nu}, \quad (8.17)$$

с учетом (8.14) и (8.15)

$$\tilde{\nu} = \nu + \frac{1 - 2\nu}{2} \Gamma^*. \quad (8.18)$$

Для определения напряженно-деформированного состояния оболочки ОЭ найдем операторы, соответствующие параметру  $B$  (см. 8.2)

$$B = \frac{\tilde{E}}{1 - \tilde{\nu}}. \quad (8.19)$$

С учетом (8.14)-(8.18) выражение (8.19) примет вид

$$B = \frac{\tilde{E}}{1 - \tilde{\nu}} = \frac{E[1 - \chi \mathfrak{D}_{\alpha}^*(-\beta - \chi)]}{1 - [\nu + \frac{1 - 2\nu}{2} \chi \mathfrak{D}_{\alpha}^*(-\beta - \chi)]^2}. \quad (8.20)$$

Экспериментально определяемая деформация  $\varepsilon(t)$  может быть представлена следующим образом

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [1 + \chi \mathfrak{D}_{\alpha}^*(-\beta) \cdot 1], \quad (8.21)$$

где  $\varepsilon_0$  – мгновенная деформация при напряжении  $\sigma$ .

По результатам проведения экспериментов необходимо определить три параметра:  $\alpha, \beta, \chi$ . При испытаниях определим начальную мгновенную деформацию  $\varepsilon_0 = \sigma / E$ . Модуль упругости  $E$  для материала пленок считаем заранее известным.

Обработку кривых ползучести выполним посредством численного преобразования Лапласа с использованием способа определения реологических параметров, который основан на применении для этой цели не самого уравнения

$$\varphi[\varepsilon(t)] = \sigma(t) + \int_0^t K(t - \tau) \cdot \sigma(\tau) d\tau, \quad (8.22)$$

а его трансформацию Лапласа.

Данный способ применим к ядру ползучести  $K(t - \tau)$  для экспоненты дробного порядка Ю.Н. Работнова

$$\chi \cdot \mathcal{E}_\alpha^*(\beta; t - \tau) = \chi \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\beta^n (t - \tau)^{n(1+\alpha)+\alpha}}{\Gamma[(n+1)(1+\alpha)]}, \quad (-1 < \alpha < 0; \beta < 0). \quad (8.23)$$

Реологические параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\chi$  определим в результате обработки кривых простой ползучести ( $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$ ) в координатной системе деформация-время посредством предварительной аппроксимации интегральных операторов. Так, в случае оператора  $\mathcal{E}_\alpha^*(\beta) \cdot 1$  Ю.Н. Работнова, имеем его вид

$$\chi \cdot \mathcal{E}_\alpha^*(\beta) \cdot 1 = \chi \int_0^t \mathcal{E}_\alpha^*(\beta; t - \tau) d\tau = -\frac{\chi}{\beta} \left[ 1 - e^{\beta(t-r_1)^{r_1}} \right]. \quad (8.24)$$

где  $r_1 = 1 + \alpha$ .

Используя интегральное преобразование Лапласа, имеем

$$p\varphi(p) = \sigma_0 [1 + K(p)], \quad (8.25)$$

где  $p$  – параметр преобразования.

Для функции  $\mathcal{E}_\alpha^*(\beta; t)$  имеем следующую зависимость

$$\mathcal{E}_\alpha^*(\beta; p) = \int_0^{\infty} \mathcal{E}_\alpha^*(\beta; t) \cdot e^{-p \cdot t} dt = \frac{1}{p^r - \beta}. \quad (8.26)$$

Взаимное соответствие функции  $\mathcal{E}_\alpha^*(\beta; t)$  и ее изображения справедливо при любом  $p$ , если только  $\text{Re } p \geq 0$  больше действительных частей особых точек правой части уравнения (8.26). При  $\beta < 0$  на ветви, фиксируемой условием  $-\pi < \arg p < \pi$  содержится только особая точка разветвления  $p = 0$ . В этом случае достаточно выполнения условия  $\text{Re } p > 0$ .

Соотношения (8.25) для ядра ползучести (8.23) с учетом (8.26) имеет вид

$$p\varphi(p) = \sigma_0 \left( 1 + \frac{\chi}{p - \beta} \right); \quad p\varphi(p) = \int_0^{\infty} \varphi[\varepsilon(t)] \cdot e^{-p \cdot t} dt. \quad (8.27)$$

Величину  $\varphi(p)$  находим численным интегрированием зависимости  $\varepsilon(t)$  из опыта на простую ползучесть.

Полагая в соотношении (8.27) параметр  $p$  равным различным действительным значениям большим нуля, образуем достаточное количество алгебраических уравнений для определения реологических параметров  $r_1, \beta, \chi$ .

Для эффективного вычисления  $\varphi(p)$  используем квадратичную интерполяционную формулу наивысшей  $2n-1$  алгебраической степени точности, которая для  $n$  узлов интерполяции  $\tau_k$ , расположенных в корнях многочлена Лягерра, имеет вид

$$p\varphi(p) \approx \sum_{k=1}^n A_k \varphi \left[ \varepsilon \left( \frac{\tau_k}{p} \right) \right]. \quad (8.28)$$

Узлы  $\tau_k$  и коэффициенты  $A_k$  для различных  $n$  приведены в литературных источниках по численным методам. Следовательно, вычисление (8.28) является простым, если результаты эксперимента позволяют выбрать значения  $\varepsilon(t)$  при  $t = \frac{\tau_k}{p}$ , полагая, что  $\varphi(\varepsilon) = \sigma/E$ .

Длительная деформация  $\varepsilon(\infty)$  из (8.27), согласно предельной теореме операционного исчисления имеет вид

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{p \rightarrow \infty} p\varepsilon(p) = \varepsilon_0 - \frac{\chi \cdot \varepsilon_0}{\beta},$$

Отсюда следует соотношение

$$\frac{\chi}{\beta} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon(\infty)}{\varepsilon_0} = \lambda. \quad (8.29)$$

Полагая в (8.27)  $p=1$ , с учетом (8.29) имеем

$$\beta = \frac{\varepsilon(1) - \varepsilon_0}{\varepsilon(1) - \varepsilon(\infty)}. \quad (8.30)$$

При любом положительном  $p \neq 1$  из (8.227) следует

$$r_1 = \frac{1}{\ln p} \ln \beta \left[ 1 + \frac{\lambda \varepsilon_0}{p\varepsilon(p) - \varepsilon_0} \right]. \quad (8.31)$$

Если порядок  $\beta$  известен, то, полагая  $p \gg |\beta|$ , из (2.20) при  $t \rightarrow \infty$  получим

$$p\varepsilon(p) - \varepsilon_0 \approx \chi \varepsilon_0 \Gamma(r_1) p^{-t},$$

откуда для  $p_1 \gg |\beta|$  и  $p_2 \gg |\beta|$  имеем

$$r_1 \approx \left[ \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right) \right]^{-1} \ln \frac{p_1 \varepsilon(p_1) - \varepsilon_0}{p_2 \varepsilon(p_2) - \varepsilon_0}.$$

С учетом соотношений (8.30) и

$$\chi[(r_1)(-\beta)^{-r_1}] = \frac{\varepsilon(\infty) - \varepsilon_0}{\varepsilon_0}$$

зависимость для определения  $\beta$  примет вид

$$\beta = -p \left[ \frac{p\varepsilon(p) - \varepsilon_0}{\varepsilon(\infty) - \varepsilon_0} \right]^{1/r_1}.$$

Для использования формул (8.30) и (8.31), определим величину  $p\varepsilon(p)$  при  $p=1$  и произвольного значения  $n$ , например,  $p=0,5$ , а в квадратурной формуле (8.28) примем число узлов  $n=5$ , значения узлов  $\tau_k$  и коэффициентов  $A_k$  определим из литературных источников.

С учетом указанных значений  $p$  достаточно определить для моментов  $t_k = \tau_k$  и  $t_k = 2\tau_k$  ( $k=1...5$ ).

Для получения зависимости  $\varepsilon = f(t)$ , определения максимальных и предельных напряжений провели экспериментальные исследования на образцах пленок, методика проведения и результаты которых приведены ниже.

8.2.2. Математическая модель нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – переносной (передвижной) теплоизолирующий контейнер – водоледяные ОЭ»

Теоретические и экспериментальные исследования теплообменных процессов в переносном (передвижном) теплоизолирующих контейнерах с замороженными водоледяными ОЭ выполнены для определения конструктивных параметров, обеспечивающих максимально возможное время хранения ОЭ до использования в противотепловой одежде.

Эти процессы представляют собой конвективную теплоотдачу рудничного воздуха с температурой  $T_b = (20...40)^\circ\text{C}$  внешней (наружной) поверхности контейнера и последующую передачу теплоты, полученной извне, через стенки контейнера – массиву ОЭ, уложенных в контейнер при начальной температуре  $T_0 = (-20...-10)^\circ\text{C}$ . В результате протекания этих процессов тем-

пература ОЭ повышается и через некоторый промежуток времени  $\tau^*$ , с, при температуре  $T^*$  выше минус 3 °С их использование является нецелесообразным.

Период хранения замороженных ОЭ является основной технической характеристикой контейнера, критерием рациональности его конструкции, зависящим от следующих параметров:

- геометрических размеров конструкции контейнеров;
- толщины и теплоизоляционных свойств материалов стенок контейнеров (однослойных или многослойных);
- начальной температуры ОЭ и их суммарной массы;
- скорости и температур: рудничного воздуха (для переносного контейнера – тела человека при его доставке на спине), температуры пород после установки контейнера на почву выработки в месте ведения работ;
- наличия воздушных прослоек между слоями стенок контейнера;
- наличия дополнительного незакрепленного слоя из прорезиненной ткани между массивом ОЭ и верхней внутренней поверхностью контейнера (для переносного контейнера);
- количества и времени извлечения ОЭ для переоснащения одежды.

Математически время хранения ОЭ  $\tau_x$ , с, можно выразить в виде функциональной зависимости [33-35]

$$\tau_x = f(t_{\text{ОЭ}}) \text{ при } t_{\text{ОЭ}} \leq 270 \text{ К (минус } 3 \text{ }^\circ\text{С);}$$

$$t_{\text{ОЭ}} = f_1(L_k, B_k, H_k, \delta_i, \alpha_i, \lambda_i, T_v, \rho_i, T_0, u, \tau_d, \tau^*, R_{\text{п}}), \quad (8.32)$$

где  $t_{\text{ОЭ}}$  – конечная температура ОЭ, К;

$L_k, B_k, H_k$  – длина, ширина и высота контейнеров, м, соответственно;

$\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя стенок, м;

$\alpha_i, \lambda_i$  – коэффициенты теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К) и теплопроводности, Вт/(м·К), материала  $i$ -го слоя стенки;

$u$  – скорость вентиляционного потока, м/с;

$\rho_i$  – плотность веществ (воздуха и льда) и материалов слоев стенок, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau_d, \tau^*$  – время доставки контейнеров и переоснащения ОЭ одежды, с;

$R_{\text{п}}$  – количество переоснащений одежды ОЭ-2, ед;

Условие  $t_{\text{ОЭ}} \leq 270 \text{ К (минус } 3 \text{ }^\circ\text{С)}$  – требования для значения начальной температуры используемых ОЭ, при которой выполняется назначение ОЭ по времени защитного действия одежды или допустимого времени работы.

Решение поставленных задач позволит произвести сравнительную характеристику теплоизоляционных свойств существующих аналогов и разрабатываемых контейнеров при использовании других, более лёгких и нетоксичных материалов, а также установить целесообразность создания во-



здушных прослоек в стенках контейнера и применения дополнительной теплоизоляции в виде прорезиненной ткани.

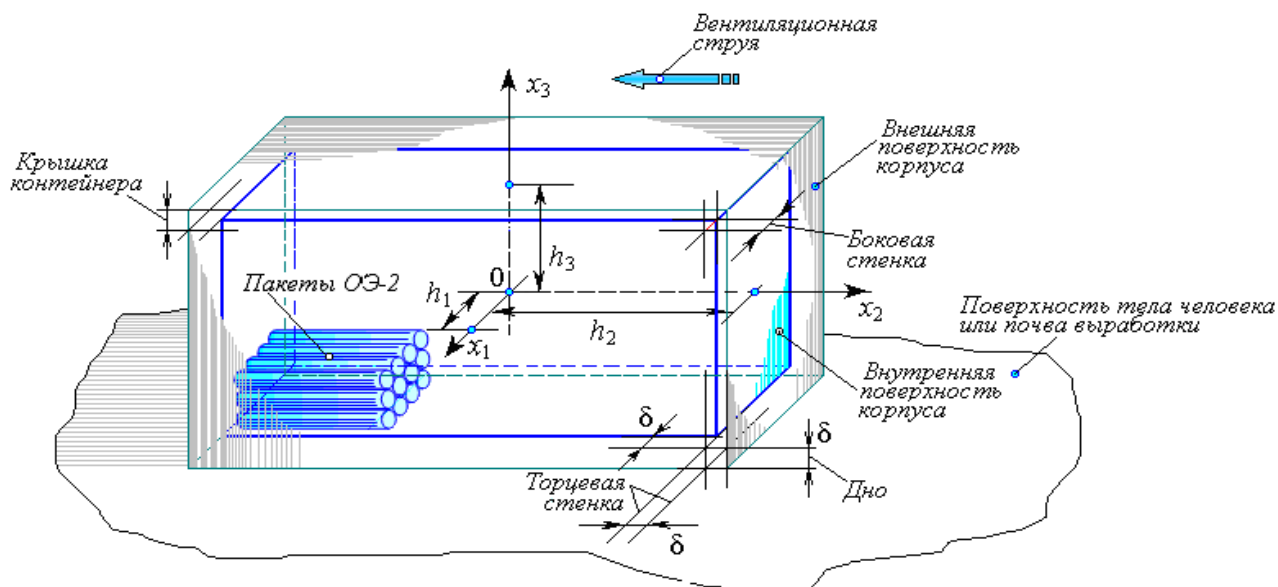


Рис. 8.15. Расчётная схема переносного теплоизолирующего контейнера

Математическая формулировка задач исследований теплообменных процессов в переносном контейнере производится при следующих допущениях.

Отсчёт времени  $\tau$  проводим после заполнения контейнера и его закрытия. Считаем, что в начальный момент ( $\tau = 0$ ) ОЭ с температурой  $T_n$ , К, уложены в контейнер до верха. Принимаем, что внутренний объём контейнера имеет форму параллелепипеда. Положение точек в массиве ОЭ определяем в прямоугольной системе координат  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ , м, начало которой совмещается с геометрическим центром внутреннего пространства контейнера (рис. 8.15).

Расстояния от начала координат до стенок контейнера:  $h_1$  – половина минимального размера внутреннего пространства контейнера (половина ширины торцевой, поперечной стенки изнутри, в горизонтальном направлении  $Ox_1$ ), м;  $h_2$  – половина максимального размера внутреннего пространства контейнера (половина длины боковой, продольной стенки изнутри, в горизонтальном направлении  $Ox_2$ ), м;  $h_3$  – половина высоты внутреннего пространства контейнера (в направлении вертикальной оси  $Ox_3$ ), м.

Предполагаем, что ОЭ уложены плотно, и можно пренебречь объёмом воздушных зазоров между пакетами и стенками контейнера. Воздух является теплоизолятором, и данное допущение позволяет получать ожидаемый период хранения ОЭ с определённым запасом надёжности. Однако при этом учитываем возможность конвективного теплообмена между верхней поверхностью массива ОЭ и воздухом после открытия контейнера в период извлечения очередного его комплекта (период переоснащения).

Так как пространство контейнера заполняется ОЭ с одинаковыми размерами и теплофизическими свойствами, то находящуюся в контейнере суммарную массу льда в оболочках, считаем однородным твёрдым телом.

С учётом принятых допущений и предположений, распределение температуры в массиве уложенных в контейнер ОЭ описывается уравнением теплопередачи

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}; \quad \tau \geq 0; \quad -h_i \leq x_i \leq h_i, \quad (8.33)$$

где  $T$  – текущая температура, К;

$a$  – коэффициент температуропроводности объёма суммарной массы ОЭ (с учётом наличия оболочек), принимаемый одинаковым по всем направлениям пространства,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$i = (1 \dots 3)$  – индекс суммирования по пространственным координатам.

В дальнейшем объём суммарной массы ОЭ в контейнере (порций льда в оболочках) кратко назовем массивом, его торцевые поверхности – торцами, продольные поверхности – боками, донную поверхность – дном, верхнюю поверхность – верхом.

Уравнение (8.33) дополним начальным условием

$$T(x_1, x_2, x_3, 0) = T_n; \quad -h_i \leq x_i \leq h_i. \quad (8.34)$$

Граничные условия запишем для периода доставки  $\tau_d$ , с, и периода переоснащения  $\tau \in [\tau_d \dots \tau^*]$ , с.

Так как неподвижный воздух отдаёт теплоту контейнеру менее интенсивно, чем подвижный, принимаем худший вариант: контейнер доставляется по стабильно проветриваемой горной выработке. Если он переносится в руках в течение  $\tau_d$ , то граничные условия на боках, торцах, дне и верхе массива – попарно симметричны. Для боков и торцов массива эта симметрия сохраняется и после установки контейнера на почву выработки в районе ведения работ. Принимается, что процесс теплопередачи через боковые и торцевые стенки контейнера в течение всего периода исследований, а через крышку и дно в период доставки, происходит в соответствии с граничными условиями третьего рода

$$-\lambda_m \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_{x_i = \pm h_i} = \pm k_i \cdot (T|_{x_i = \pm h_i} - T_b); \quad i = 1, 2; \quad \tau > 0, \quad (8.35)$$

$$-\lambda_m \cdot \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{x_3 = \pm h_3} = \pm k_3 \cdot (T|_{x_3 = \pm h_3} - T_b); \quad \tau < \tau_d, \quad (8.36)$$

где  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности массива, который, как и коэффициент температуропроводности, принимается одинаковым по всем направлениям, Вт/(м·К); знак правых частей (8.35) совпадает со знаком  $h_i$ ;

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^{n_i} \frac{\delta_{ij}}{\lambda_{ij}}} \quad (8.37)$$

эквивалентный коэффициент теплопередачи (термической проводимости) корпуса контейнера в направлениях  $x_i$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\alpha_i$  – коэффициент конвективной теплоотдачи потока рудничного воздуха внешней поверхности контейнера, зависящий от размеров стенок (в том числе дна и крышки контейнера) и скорости вентиляционной струи Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$n_i$  – число слоёв стенок контейнера с возможными воздушными прослойками и прорезиненной тканью в направлениях  $x_i$ ;

$j$  – индекс суммирования по слоям, прослойкам и прорезиненной ткани (в дальнейшем последнее также назовем слоями);

$\delta_{ij}$  – толщина  $j$ -го слоя стенки в направлении  $x_i$ , м;

$\lambda_{ij}$  – коэффициент теплопроводности  $j$ -го слоя стенки в направлении  $x_i$ , Вт/(м·К).

Симметрия условий (8.34) нарушается при доставке контейнера на спине. В этом случае граничное условие на одной из боков массива, например, при  $x_1 = +h_1$  заменяем на условие второго рода

$$\lambda_{\vartheta 1} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_1} \bigg|_{x_1=h_1} = q_{\text{ч}}; \quad 0 < \tau < \tau_{\text{д}}, \quad (8.38)$$

$$\text{где} \quad \lambda_{\vartheta 1} = \frac{\lambda_m \cdot h_1 + \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_{1j} \cdot \delta_{1j}}{h_1 + \sum_{j=1}^{n_1} \delta_{1j}} \quad (8.39)$$

эквивалентная (средневзвешенная) теплопроводность боковых стенок контейнера и массива ОЭ в направлении  $0x_1$ ;

$q_{\text{ч}}$  – удельный поток теплоты, выделяемой человеком, Вт/м<sup>2</sup>.

После доставки контейнера и установки его на почву выработки на дне массива задаём граничное условие аналогичное (8.37)

$$\lambda_{\text{э3}} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{x_3=-h_3} = q_{\text{п}}; \quad \tau \geq \tau_{\text{д}}, \quad (8.40)$$

$$\text{где} \quad \lambda_{\text{э3}} = \frac{\lambda_{\text{м}} \cdot h_3 + \sum_{j=1}^{n_3} \lambda_{3j} \cdot \delta_{3j}}{h_3 + \sum_{j=1}^{n_3} \delta_{3j}} - \quad (8.41)$$

эквивалентная (средневзвешенная) теплопроводность дна контейнера и массива в направлении  $0x_3$ ;

$q_{\text{п}}$  – удельный поток теплоты из горных пород в районе ведения работ, Вт/м<sup>2</sup>.

В периоды извлечения комплектов ОЭ из контейнера в граничное условие (8.34) для верха массива вместо  $k_3$  подставляем значение коэффициента конвективной теплоотдачи потока рудничного воздуха верхнему слою массива  $\alpha_3$

$$-\lambda_{\text{м}} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{x_3=+h_3-(r-1) \cdot \Delta h_3} = \alpha_3 \cdot (T|_{x_3=+h_3-(r-1) \cdot \Delta h_3} - T_{\text{в}}); \quad (8.42)$$

$$\tau \geq \tau_{\text{д}}; \quad \tau \in [\tau_r, \tau_r + \Delta \tau_r], \quad r = 1 \dots R_{\text{п}},$$

где  $\Delta h_3$  – высота извлекаемого из контейнера слоя комплекта ОЭ, м;

$r$  – номер очередного извлекаемого комплекта по порядку;

$\tau_r, \Delta \tau_r$  – моменты времени открытия контейнера для извлечения комплектов ОЭ и его длительность, с.

После завершения извлечения комплекта и закрытия крышки на верху массива задаём условие

$$-\lambda_{\text{в}} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{x_3=+h_3-r \cdot \Delta h_3} = k_{3r} \cdot (T|_{x_3=+h_3-r \cdot \Delta h_3} - T_{\text{в}});$$

$$\tau \geq \tau_{\text{д}}; \quad \tau \notin [\tau_r, \tau_r + \Delta \tau_r], \quad r = 1 \dots R_{\text{п}}, \quad (8.43)$$

$$k_{3r} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n_3} \frac{\delta_{ij}}{\lambda_{ij}} + r \cdot \frac{\Delta h_3}{\lambda_B}},$$

где  $\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При этом верх массива опускается на величину  $(r-1) \cdot \Delta h_3$ .

Таким образом, в математической формулировке, задача заключается в решении уравнения (8.32) с начальным условием (8.33) и граничными условиями (8.34), (8.35), (8.37), (8.39), (8.41), (8.42).

При дальнейших исследованиях уравнение и краевые условия представляем в критериальном виде. Для этого вместо  $T(x, y, z, \tau)$  рассматриваем функцию  $\theta(x, y, z, \tau)$ , равную отношению разности (приращения) между температурой массива внутри контейнера и температурой окружающей среды, к той же разности в начальный момент, а именно

$$\theta = \frac{T - T_B}{T_H - T_B} \text{ или } T = T_B + (T_0 - T_B) \cdot \theta, \quad (8.44)$$

и вводим безразмерные координаты

$$\xi_i = \frac{x_i}{h_K}, \quad (8.45)$$

где  $h_K$  – характерный линейный внутренний размер контейнера, принимаем  $h = h_{\max}$ .

Относительно  $\theta$  в координатах (8.45) записываем математическую модель процесса следующим образом

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi_i^2}; \quad Fo \geq 0; \quad -l_i \leq \xi_i \leq +l_i \quad (8.46)$$

при начальном условии

$$\theta(\xi_1, \xi_2, \xi_3, 0) = \theta_0 = 1 \quad (8.47)$$

и следующих граничных условиях.

На боках и торцах массива при доставке контейнера в руках

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \xi_i} \Big|_{\xi_i = \pm l_i} = \pm \text{Bi}_i \cdot \theta \Big|_{\xi_i = \pm l_i}; \quad i = 1, 2; \text{Fo} > 0 \quad (8.48)$$

При доставке контейнера на спине условия (8.38), (8.39) сохраняются за исключением боковой поверхности с положительной координатой  $\xi_1$ , т.е.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi_1} \Big|_{\xi_1 = l_1} = \begin{cases} \text{Bi}_q, & 0 < \text{Fo} < \text{Fo}_d; \\ \text{Bi}_1 \cdot \theta \Big|_{\xi_1 = l_1}, & \text{Fo} \geq \text{Fo}_d. \end{cases} \quad (8.49)$$

На дне массива

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi_3} \Big|_{\xi_3 = -l_3} = \begin{cases} \text{Bi}_3 \cdot \theta \Big|_{\xi_3 = -l_3}, & 0 < \text{Fo} < \text{Fo}_d; \\ \text{Bi}_n, & \text{Fo} \geq \text{Fo}_d. \end{cases} \quad (8.50)$$

На верху массива при доставке, в период переоснащения при открытой крышке и в период при закрытой крышке

$$-\frac{\partial \theta_3}{\partial \xi_3} \Big|_{\xi_3 = l_3} = \text{Bi}_3 \cdot \theta_3 \Big|_{\xi_3 = l_3}, \quad 0 < \text{Fo} < \text{Fo}_d; \quad (8.51)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \xi_3} \Big|_{\xi_3 = l_3 - (r-1) \cdot \Delta \xi_3} = \text{Bi}_{3\alpha} \cdot \theta \Big|_{\xi_3 = l_3 - (r-1) \cdot \Delta \xi_3}, \quad \text{Fo} \in [\text{Fo}_r, \text{Fo}_r + \Delta \text{Fo}_r]; \quad (8.52)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \xi_3} \Big|_{\xi_3 = l_3 - r \cdot \Delta \xi_3} = \text{Bi}_{3r} \cdot \theta \Big|_{\xi_3 = l_3 - r \cdot \Delta \xi_3}, \quad \text{Fo} \notin [\text{Fo}_r, \text{Fo}_r + \Delta \text{Fo}_r], \quad (8.53)$$

$$\text{где } \text{Fo} = \frac{a}{h_k^2} \cdot \tau; \quad \text{Fo}_d = \frac{a}{h_k^2} \cdot \tau_d; \quad \text{Fo}_r = \frac{a}{h_k^2} \cdot \tau_r; \quad \Delta \text{Fo}_r = \frac{a}{h_k^2} \cdot \Delta \tau_r - \quad (8.54)$$

безразмерные комплексы, характеризующие время (числа Фурье);  $l_i = h_i / h_k$  – одно из безразмерных расстояний  $h_i$ ;  $\Delta l_3 = \Delta h_3 / h_k$ ;

$$\text{Bi}_i = \frac{k_i \cdot h_k}{\lambda_m}; \quad \text{Bi}_{3\alpha} = \frac{\alpha_3 \cdot h_k}{\lambda_m}; \quad \text{Bi}_{3r} = \frac{k_{3r} \cdot h_k}{\lambda_m}; \quad \text{Bi}_q = \frac{q_q \cdot h_k}{\lambda_{\text{э1}}}; \quad \text{Bi}_n = \frac{q_n \cdot h_k}{\lambda_{\text{э3}}} - \quad (8.55)$$

безразмерные комплексы, характеризующие интенсивность теплопередачи через корпус контейнера (числа Био).

Учёт многослойности контейнера в граничных условиях позволяет про-

изводить сравнительную оценку его теплоизоляции в зависимости от теплофизических свойств составляющих его слоёв, в том числе при наличии или отсутствии воздушной прослойки между слоями.

Принятое различие в теплопередаче по направлениям координатных осей позволяет моделировать теплообменные процессы при наличии воздушного пространства переменного объёма под крышкой контейнера после очередного извлечения ОЭ, при наличии или отсутствии дополнительной прорезиненной ткани.

Следовательно, уравнение (8.46) с краевыми условиями (8.47)-(8.53) представляют собой математическую формулировку задач исследований. Для их решения необходимо знать теплоизоляцию стенок контейнера, которую оценивают величиной коэффициента теплопередачи  $k_i$  с учётом геометрических размеров стенок, числом  $Bi_i$ .

Для проведения дальнейших исследований определим диапазон изменения этих показателей в зависимости от следующих факторов: конструкции стенок контейнера (числа слоёв и их толщины); теплофизических свойств материалов, составляющих конструкцию; скорости воздушного потока, омывающего контейнер. Теплофизические параметры воздуха, льда и материалов конструкции контейнеров, используемых (пенополиэтилен, пенополистирол) и предлагаемых для использования (пенополиуретан, прорезиненная ткань), приведены в табл. 2.1

Одной из составляющих коэффициента теплопередачи является коэффициент теплоотдачи  $\alpha_i$  окружающей воздушной среды наружной поверхности контейнера. Определим диапазон его изменения.

Параметр  $\alpha_i$  является одной из характеристик интенсивности поступления теплоты через стенки контейнера извне в результате соприкосновения поверхности контейнера с потоком движущегося по горным выработкам воздуха. Этот вид переноса теплоты называют конвективным, а его интенсивность определяют безразмерным комплексом Нуссельта (числом  $Nu$ ), в который входит коэффициент теплоотдачи  $\alpha_m$

$$Nu = \frac{\alpha_m \cdot l}{\lambda_b}, \quad (8.56)$$

где  $l=2 \cdot h_k$  – характерный линейный размер омываемой воздухом поверхности, для прямоугольной плоскости им является наибольший из её размеров (нижний индекс «i» далее не приводится), м;

$$\lambda_b = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

В свою очередь, для прямоугольной плоскости число  $Nu$  зависит от числа Рейнольдса ( $Re$ ) следующим образом

$$Nu = 0,032 \cdot Re^{0,8}, \quad (8.57)$$

где  $Re = \frac{u \cdot l}{\nu_k}$ . (8.58)

Здесь  $\nu_k$  – кинематическая вязкость воздуха,  $m^2/s$ .

Теплофизические параметры различных веществ и материалов контейнера приведены в табл.8.4.

Таблица 8.4

Теплофизические параметры веществ и материалов\*

Вещество, материал	$T, ^\circ C$	$\rho, \frac{кг}{м^3}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{Вт}{м \cdot K}$	$c_p, \frac{кДж}{кг \cdot K}$	$\alpha \cdot 10^6, \frac{м^2}{с}$	$\nu_k \cdot 10^6, \frac{м^2}{с}$
Воздух	0	1,293	2,44	1,005	17,2	13,28
	20	1,205	2,59	1,005	18,1	15,06
	40	1,128	2,76	1,005	19,1	16,96
Лёд	0	920	225	2,26	1,08	–
Прорезиненная ткань	0	1200	16,3	1,38	0,0985	–
Пенополистирол		50	3,373	–	0,0895	–
Пенополиуретан	–	–	2,0	–		–
Пенополиэтилен	минимум	60	4,652	–	0,0139	–
	максимум	87		–	0,2306	–

\*  $c_p$  – теплоемкость

На основании (8.56-8.58) для вычисления коэффициента теплоотдачи получается выражение:

$$\alpha_m = \frac{\lambda_b}{2 \cdot l} \cdot Nu = 0,032 \cdot \frac{\lambda_b}{l} \cdot Re^{0.8} = 0,032 \cdot \frac{\lambda_b}{l^{0.2}} \cdot \left( \frac{u}{\nu_k} \right)^{0.8}. \quad (8.59)$$

При худших условиях: температуре рудничного воздуха  $T_b = 40^\circ C$ ; максимальной из возможной скорости вентиляционной струи на выемочных участках  $u = 5,0 м/с$ ; ориентировочном продольном размере контейнера  $l = 0,55 м$  значение величины коэффициента теплоотдачи равно  $23,6 Вт/(м^2 \cdot K)$ .

Минимальная удельная мощность теплоты, которая может передаваться наружной поверхности контейнера (в случае  $T = T^* = -3^\circ C$  и  $T_b = 40^\circ C$ ), при вышеуказанном значении коэффициента теплоотдачи равна:



$$q_{\min} = \alpha_m \cdot (T_B - T^*) = 1014,8 \text{ Вт/м}^2$$

Для сравнения отметим, что организм человека в спокойном состоянии вырабатывает около  $320 \text{ кДж/ч} \approx 89 \text{ Вт}$  теплоты, при физической нагрузке средней напряжённости – примерно  $800 \text{ кДж/ч} \approx 222 \text{ Вт}$ , а при тяжёлой физической нагрузке – до  $1600 \text{ кДж/ч} \approx 444 \text{ Вт}$ . Если предположить, что при доставке контейнера на спине человек испытывает тяжёлую физическую нагрузку, то при площади поверхности тела  $S_q = 2,0 \text{ м}^2$ ,  $q_q = 222 \text{ Вт/м}^2$ , что более чем в 4 раза меньше величины удельной мощности конвективной теплоотдачи  $q_{\min}$ .

Средний удельный тепловой поток из недр Земли к её поверхности ещё менее значителен и составляет  $7 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2$ . Поэтому, если в период доставки не учитывать возможный контакт контейнера с телом человека, а в период переоснащения – с почвой выработки, то результаты моделирования динамики температуры будут иметь запас надёжности, так как теплоотдача движущегося потока воздуха поверхности контейнера конвекцией (граничное условие третьего рода), протекает значительно интенсивнее, чем теплопередача на границе соприкосновения контейнера с телом человека или почвой выработки (граничное условие второго рода).

Таким образом, до первого открытия контейнера задачу можно считать симметричной относительно геометрического центра массив ОЭ, а в период переоснащения учитывать отсутствие симметрии только по высоте контейнера, ввиду изменения граничного условия на верху массива.

Расчётные значения коэффициента теплопередачи и числа Био в зависимости от конструкции стенок контейнера приведены в табл.8.5. Вариант 1 с однослойной сравнительно толстой, тяжёлой стенкой считается конструкцией известного аналога, а вариант 4 – предлагаемая конструкция.

Результаты анализов вариантов конструкций стенок контейнера и расчетов показывают, что создание воздушной прослойки, толщиной 1 см в исходной конструкции (вариант 2), наряду с облегчением стенки, позволяет снизить теплопередачу почти на 12 % ( $Bi_1 = 0,1094$ ;  $Bi_2 = 0,0967$ ). Замена на пенополиуретан (вариант 3) позволяет улучшить этот показатель ещё на 52 % ( $Bi_3 = 0,0508$ ). Дополнение конструкции прорезиненной тканью толщиной 0,5 см (вариант 4) на теплоизоляцию стенки практически не оказывает ( $Bi_4 = 0,0502$ ). Однако этот слой будет препятствовать непосредственному контакту верхних пакетов ОЭ с тёплым воздухом в образующемся под крышкой свободном пространстве по мере их извлечения.

Результаты расчётов теплоизоляции крышки контейнера после извлечения первого комплекта (вариант 5) показывают, что наличие воздушной прослойки толщиной 50 мм между крышкой контейнера и прорезиненной тканью снижает теплопередачу на 67 % ( $Bi_5 = 0,0165$ ) по сравнению с вариантом 4 – полностью загруженного контейнера.

При длительности исследуемого суммарного периода доставки и переоснащения  $\tau = (6 \dots 8)$  ч, максимальное значение числа Фурье изменяется в диапазоне  $Fo_6 = 0,308 \dots Fo_8 = 0,411$ .

Таким образом, результаты математического моделирования динамики температуры массива ОЭ при решении поставленных задач (8.46...8.53) в диапазоне изменения  $Bi = (0,0165 \dots 0,1094)$  позволят определить параметры конструкции теплоизолирующего контейнера минимальной массы с максимальным сроком хранения ОЭ.

С учетом принятых допущений и предположений распределение температуры в массиве уложенных в контейнер ОЭ для периода доставки и хранения  $\tau_d$  опишем уравнением теплопроводности в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi_i^2}, \quad (0 \leq Fo < Fo_d; \quad 0 \leq \xi_i \leq l_i); \quad (8.60)$$

$$\theta(\xi_1, \xi_2, \xi_3, 0) = \theta_0 = 1; \quad (8.61)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi_i} \right|_{\xi_i=0} = 0; \quad (8.62)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi_i} \right|_{\xi_i=l_i} + Bi_i \theta|_{\xi_i=l_i} = 0. \quad (8.63)$$

Ввиду симметрии задачи областью определения функции  $\theta(\xi_1, \xi_2, \xi_3, Fo)$  уравнения (8.60) являются неотрицательные значения аргументов  $\xi_i$ , а производная в начале координат (8.62) приравнивается нулю.

Искомую функцию  $\theta$  можно представить произведением трёх функций, каждая из которых зависит только от одной пространственной координаты и является решением задачи, подобной (8.60)-(8.63):

$$\theta(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \tau) = \vartheta_1(\xi_1, \tau) \vartheta_2(\xi_2, \tau) \vartheta_3(\xi_3, \tau), \quad (8.64)$$

где  $\vartheta_i(\xi_i, \tau)$  – распределение температуры в трёх взаимно перпендикулярных стенках толщиной  $2l_i$ , с плоскостями симметрии  $\xi_2 0 \xi_3$ ,  $\xi_1 0 \xi_3$ ,  $\xi_1 0 \xi_2$  при  $i = 1, 2, 3$  соответственно.

Относительные приращения температуры каждой из стенок изменяются только в одном направлении  $0 \xi_i$ . Например, температура стенки  $\xi_1 0 \xi_2$  толщиной  $2l_1$  изменяется только в направлении  $0 \xi_1$ , так как стоки или притоки теплоты на краях, удалённых в направлениях  $0 \xi_2$  и  $0 \xi_3$ , не сказываются на распределении температуры по толщине (рис. 8.16).

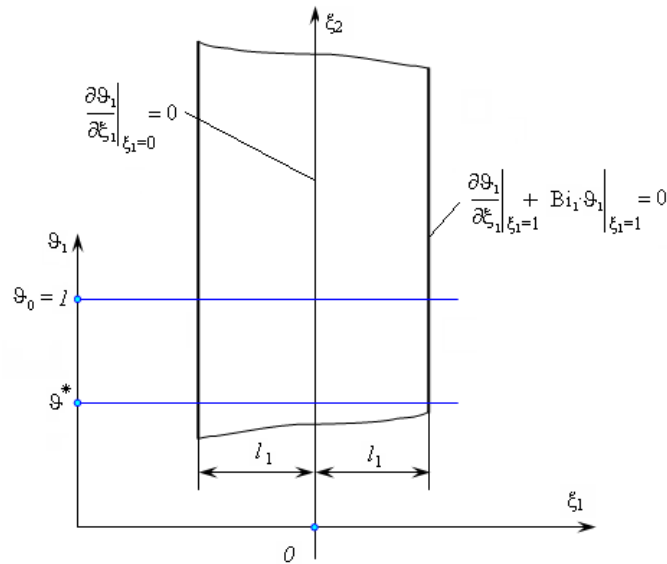


Рис. 8.16. Расчётная схема стенки контейнера для определения температуры:

$\vartheta_0$  – начальное распределение температуры;

$\vartheta^*$  – уровень температуры таяния льда

Со временем относительная температура  $\vartheta_i(\xi_i, \tau)$  понижается (фактическая температура в размерных переменных повышается) от начального единичного уровня  $\vartheta_0$  до исследуемого в рамках рассматриваемой задачи относительного уровня температуры таяния льда:

$$\vartheta^* = \frac{T_B - T^*}{T_B - T_H}, \quad (8.65)$$

где  $T^* = 270 \text{ K}$  (минус  $3^\circ \text{C}$ ).

При  $T_H = 263 \text{ K}$  (минус  $10^\circ \text{C}$ ) этот уровень не должен превышать 0,8.

Ввиду того, что задача решается в отдельности для каждой температуры  $\vartheta_i$ , с целью упрощения выкладок в каждом из конкретных направлений используем свой характерный линейный размер  $h_i$ , при этом

$$\xi_i = \frac{x_i}{h_i}; \quad \text{Fo}_i = \frac{a\tau}{h_i^2}; \quad \text{Bi}_i = \frac{k_i h_i}{\lambda_i}. \quad (8.66)$$

Выражения (8.66) соответствуют физическому смыслу рассматриваемой задачи. При одинаковой теплоизоляции стенок ( $k_1 = k_2 = k_3$ ) процессы теплообмена в тонких стенках протекают быстрее ( $\text{Fo}_1 > \text{Fo}_3 > \text{Fo}_2$ ), а интенсивность теплопередачи ниже, чем в более толстых ( $\text{Bi}_1 < \text{Bi}_3 < \text{Bi}_2$ ).

После определения  $\vartheta_i$  при вычислении  $\theta$  можно вновь возвратиться к общему линейному масштабу  $h_K = h_2$  путём введения соответствующих мно-

жителей  $m_1 = h_k / h_1$  и  $m_3 = h_k / h_3$  в выражении (2.64) для чисел  $Fo_i$  ( $m_2 = 1$ ).

Решение задачи (8.60) – (8.63) находим с помощью метода разделения переменных Фурье. В результате получаем общее решение уравнения (8.60) при замене  $\theta$  на  $\theta_i$  и  $Fo$  на  $Fo_i$ .

Для определения неизвестных констант находим производную

$$\vartheta = C_1 e^{-\mu^2 \cdot Fo} [C_2 \cos(\mu \xi) + C_3 \sin(\mu \xi)] \quad (8.67)$$

по направлению  $\xi$ :

$$\frac{d\vartheta}{d\xi} = C_1 e^{-\mu^2 Fo} [-C_2 \mu \sin(\mu \xi) + C_3 \mu \cos(\mu \xi)] . \quad (8.68)$$

Это выражение должно обращаться в ноль при  $\xi = 0$ . Так как  $\mu \sin(\mu 0) = 0$  и  $\mu \cos(\mu 0) \neq 0$  при  $\mu > 0$ , то это условие в формуле (8.68) выполняется только в случае  $C_3 = 0$ , что соответствует симметрии задачи (отсутствие нечётной составляющей функции синуса). Поэтому

$$\vartheta = C e^{-\mu^2 Fo} \mu \cos(\mu \xi); \quad (8.69)$$

$$\frac{d\vartheta}{d\xi} = -C e^{-\mu^2 Fo} \mu \sin(\mu \xi), \quad (8.70)$$

где  $C = C_1 C_2$ .

Из уравнения (8.70) следует, что

$$C e^{-\mu^2 Fo} = \frac{\vartheta}{\cos(\mu \xi)} \quad (8.71)$$

и после подстановки формулы (8.67) в (8.66) получаем выражение для производной по направлению

$$\frac{d\vartheta}{d\xi} = -\frac{\vartheta}{\cos(\mu \xi)} \mu \sin(\mu \xi),$$

которое при  $\xi = 1$  имеет вид

$$\left. \frac{d\vartheta}{d\xi} \right|_{\xi=1} = -\mu \vartheta|_{\xi=1} \operatorname{tg} \mu . \quad (8.72)$$

Если в граничном условии (8.63) использовать выражение для произ-

водной (8.72) и учесть, что  $\vartheta$  при  $\xi=1$  – значение, отличное от нуля, то (8.63) выполняется при условии

$$\operatorname{ctg} \mu = \mu / \operatorname{Bi}. \quad (8.73)$$

Уравнение (8.73) имеет бесконечное множество решений  $\mu_n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ), каждому из которых, в соответствии с выражением (8.69), соответствует частное решение

$$\theta_n(\xi, \operatorname{Fo}) = C_n e^{-\mu_n^2 \operatorname{Fo}} \cos(\mu_n \xi), \quad (8.74)$$

где  $C_n$  – значения  $C$  при  $\mu = \mu_n$ .

Значения  $\mu_n$  определяли с помощью специально разработанного программного обеспечения итерационным методом на каждом из интервалов  $\mu_n \in [(n-1)\pi; n\pi]$  (рис. 8.17).

Решения уравнения (8.74) удовлетворяют граничным условиям (8.62) и (8.63) при любых  $C_n$ .

Тогда знакопеременный сходящийся ряд

$$\theta(\xi, \operatorname{Fo}) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\mu_n^2 \operatorname{Fo}} \cos(\mu_n \xi), \quad (8.75)$$

является общим решением (8.60).

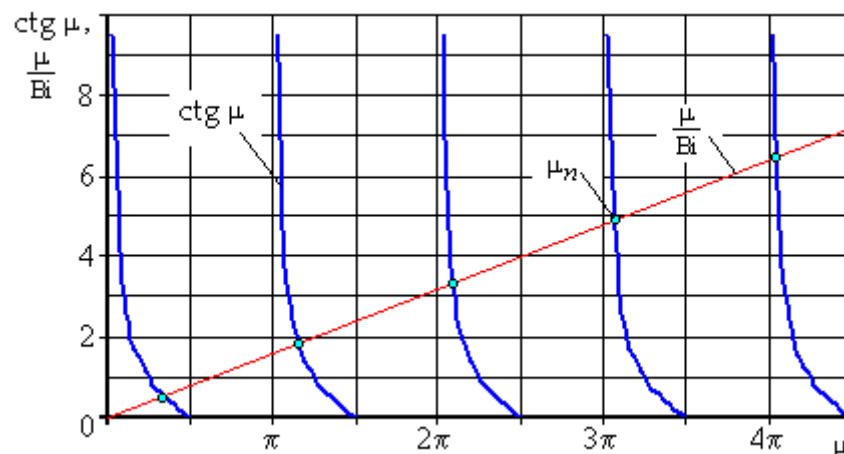


Рис. 8.17. Распределение значений  $\mu_n$  по интервалам  $[(n-1)\pi; n\pi]$

Неизвестные  $C_n$  определяем из начального условия (8.61), в соответствии с которым должно выполняться равенство

$$\theta(\xi, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(\mu_n \xi) = 1. \quad (8.76)$$

Согласно формулам интегрирования функций

$$\int_0^1 \cos(\mu_n \xi) \cos(\mu_m \xi) d\xi = \begin{cases} 0, & n \neq m; \\ \frac{1}{2\mu_n} \sin 2\mu_n, & n = m, \end{cases}$$

после умножения обеих частей уравнения (8.75) на  $\cos(\mu_m \xi)$  при  $m = 1, 2$  и интегрирования по  $\xi \in [0, 1]$ , получаем систему алгебраических уравнений относительно  $C_n$ , из которой следует:

$$C_n = \int_0^1 \frac{1}{\cos(\mu_n \xi)} d\xi = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}. \quad (8.77)$$

Учитывая, что в интервалах  $[(n-1)\pi; n\pi]$  с нечётными  $n$  функция  $\sin \mu_n$  положительная, а с чётными – отрицательная, в соответствии с выражением (8.69) можно записать

$$\sin \mu_n = (-1)^{n-1} \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \mu_n}} = (-1)^{n-1} \frac{\operatorname{Bi}}{\sqrt{\operatorname{Bi}^2 + \mu_n^2}}, \quad (8.78)$$

$$\cos \mu_n = (-1)^{n-1} \sqrt{\frac{\operatorname{ctg}^2 \mu_n}{1 + \operatorname{ctg}^2 \mu_n}} = (-1)^{n-1} \frac{\mu_n}{\sqrt{\operatorname{Bi}^2 + \mu_n^2}}. \quad (8.79)$$

В результате, после подстановки уравнений (8.78) и (8.79) в (8.77) получаем выражение для определения  $C_n$ :

$$C_n = (-1)^{n-1} \frac{\operatorname{Bi} \sqrt{\operatorname{Bi}^2 + \mu_n^2}}{\mu_n (\operatorname{Bi}^2 + \mu_n^2 + \operatorname{Bi})}.$$

Тогда решение задачи (8.60) – (8.63) имеет вид

$$\vartheta(\xi_i, \operatorname{Fo}_i) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ (-1)^{n-1} \frac{2 \operatorname{Bi}_i \sqrt{\operatorname{Bi}_i^2 + \mu_{ni}^2}}{\mu_{ni} (\operatorname{Bi}_i^2 + \mu_{ni}^2 + \operatorname{Bi}_i)} \cos(\mu_{ni} \xi_i) e^{-\mu_{ni}^2 \operatorname{Fo}_i} \right]. \quad (8.80)$$

Здесь восстановлен нижний индекс направления  $i$ .

С учётом выражений (8.64) и (8.80) решение исходной задачи имеет вид

$$\theta = \prod_{i=1}^3 \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[ (-1)^{n-1} \frac{2\text{Bi}_i \sqrt{\text{Bi}_i^2 + \mu_{ni}^2}}{\mu_{ni}(\text{Bi}_i^2 + \mu_{ni}^2 + \text{Bi}_i)} \cos(\mu_{ni} \xi_i) e^{-\mu_{ni}^2 \text{Fo}_i} \right] \right\}, \quad (8.81)$$

где, в отличие от (8.80),  $\text{Fo}_1$  и  $\text{Fo}_3$  вычисляются с поправкой на множители  $m_1 = h_k / h_1$  и  $m_3 = h_k / h_3$  соответственно.

Как было сказано выше, в нашем случае число  $\text{Bi}$  значительно меньше 1. С учётом этого проанализируем полученное решение (8.81).

Если критерий Био бесконечно мал  $\text{Bi}_i \rightarrow 0$  (практически абсолютная теплоизоляция), то и  $\alpha_i \rightarrow 0$ , т.е. теплоотдачи воздуха стенкам не происходит и  $\theta_i|_{\xi_i=1} \approx \theta_0$ . При этом  $\mu_{ni} \approx (n-1)\pi$  (прямые  $\mu_{ni}/\text{Bi}_{ni}$  (см. рис. 8.17) практически вертикальные). Так как при бесконечно малом аргументе  $t$ :  $\sin t|_{t \rightarrow 0} = t$ , то в соответствии с (8.77), где нижний индекс  $i$  не приводится, первый коэффициент разложения

$$C_1 = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \cos \mu_1 \sin \mu_1} \Big|_{\mu_1 \rightarrow 0} = \frac{2\mu_1}{1 + \cos \mu_1 \mu_1} \Big|_{\mu_1 \rightarrow 0} = 1, \quad (8.82)$$

а остальные ( $n > 1$ )

$$C_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \cos \mu_n \sin \mu_n} \Big|_{\mu_n \rightarrow (n-1)\pi} = \frac{2 \sin[(n-1)\pi]}{(n-1)\pi + \cos[(n-1)\pi] \sin[(n-1)\pi]} = 0. \quad (8.83)$$

Так как  $\text{tg} t|_{t \rightarrow 0} = t$ , то из (8.72) следует, что при бесконечно малом  $\text{Bi}$

$$\mu_n^2 = \text{Bi}. \quad (8.84)$$

Таким образом, когда  $\text{Bi}_i \rightarrow 0$ , то на основании (8.82)-(8.84) выражения для температуры в отдельных направлениях (8.80) и массива ОЭ в целом (8.81) преобразуем к виду

$$\vartheta_i = \cos(\sqrt{\text{Bi}_i} \xi_i) e^{-\text{Bi}_i \text{Fo}_i}, \quad (8.85)$$

$$\theta = \prod_{i=1}^3 \left[ \cos(\sqrt{\text{Bi}_i} \xi_i) e^{-\text{Bi}_i \text{Fo}_i} \right]. \quad (8.86)$$

Выражения (8.85), (8.86) можно использовать для расчёта температуры нагревающегося тела при  $\text{Bi} < 0,1$ . Кроме того, имеется возможность ограничения первыми членами ряда, когда  $\text{Fo} > 0,3$ . Ранее при допущении о равномерном по объему контейнера температуры массива ОЭ, т.е. на основании  $\text{Bi} = 0,027 < 0,1$  в уравнениях (8.84), (8.83) полагали  $\cos(\sqrt{\text{Bi}_i} \xi_i) = 1$  и проводили исследования в условиях экспоненциальной зависимости температуры от времени

$$\theta = \exp \left[ - \left( 1 + \frac{h_1}{h_2} + \frac{h_1}{h_3} \right) \text{BiFo} \right], \quad (8.87)$$

где  $\text{Bi} = \frac{kh_1}{\lambda_b}$ ;  $\text{Fo} = \frac{a\tau}{h_1^2}$ .

В соответствии с уравнением (8.87) в каждый момент времени температура во всех ОЭ контейнера одинакова, что не соответствует истине.

В наших исследованиях число Фурье для фактического периода доставки  $\tau_d < 2$  ч не может превышать 0,3. Кроме того, при значении  $\text{Bi} = 0,027$ , принятом ранее, на границах массива  $\cos^3(\sqrt{\text{Bi}_i} \xi_i)_{\xi_i=h_i} = \cos^3(\sqrt{0,027} \cdot 1) = 0,987^3 = 0,960$ . В нашем случае рассматривается диапазон температуры  $\theta = \theta^* \dots 1$ , причем при температуре окружающей среды  $40^\circ\text{C}$  значение  $\theta^*$  равно 0,8. Таким образом, исследуемый диапазон составляет не более 20% от начальной температуры. Если учесть, что степень теплоизоляции оценивают по наибольшему значению  $\text{Bi}$  (не на продольной, а на торцевой стенке, где для конструкции контейнера, исследуемой ранее,  $\text{Bi}=0,097$ ), то эта погрешность составит не 4 %, а 14 %, так как  $\cos^3(\sqrt{0,097}) = 0,862$ .

Это подтверждается результатами расчётов, представленными на рис. 8.18 и в табл. 8.6. Расчёты произведены с помощью специально разработанного программного обеспечения. Здесь кривые 1 и 1' получены на основании точного решения задачи для предлагаемой конструкции и конструкции аналога, соответственно.

Анализ результатов показывает, что гипотеза о регулярном тепловом режиме в рамках рассматриваемой задачи является ошибочной, так как в диапазоне  $\text{Bi} = (0,0502 \dots 0,1094)$  отклонения решения (8.87) (см. рис. 8.18, кривые 3, 3') от точного решения (8.82) составляют (3,2...6,8) %. При этом важно не абсолютное значение этих отклонений, а то, что они положительные, т.е. по формулам регулярного теплового режима темпы нагревания занижены. В нашем случае (см. рис. 8.18), чем ниже  $\theta$ , тем выше  $T$ .



Использование решения (8.87) также не допустимо, в связи с тем, что оно явно не удовлетворяет начальному условию. Соответствующие ему кривые температуры (см. рис. 8.18, кривые 2, 2') при  $Fo = 0$  отличаются от 1 соответственно на 5% и 10 %.

В соответствии с точным решением безразмерная температура в угловых точках массива ОЭ аналога и разрабатываемого контейнера (здесь, с физической точки зрения, происходит наиболее интенсивный теплообмен, и достигается максимальная по объёму массива температура) к концу рассматриваемого периода равна 0,749 и 0,874 (см. табл. 8.6). Следовательно, предлагаемая конструкция контейнера позволяет снизить уровень нагрева массива ОЭ на 17,4 %. В результате проведенных исследований доказана неправомерность сопоставления теплообменных процессов в системе «окружающая среда – теплоизолирующий контейнер – водоледяные ОЭ» с регулярным тепловым режимом, как это было сделано ранее.

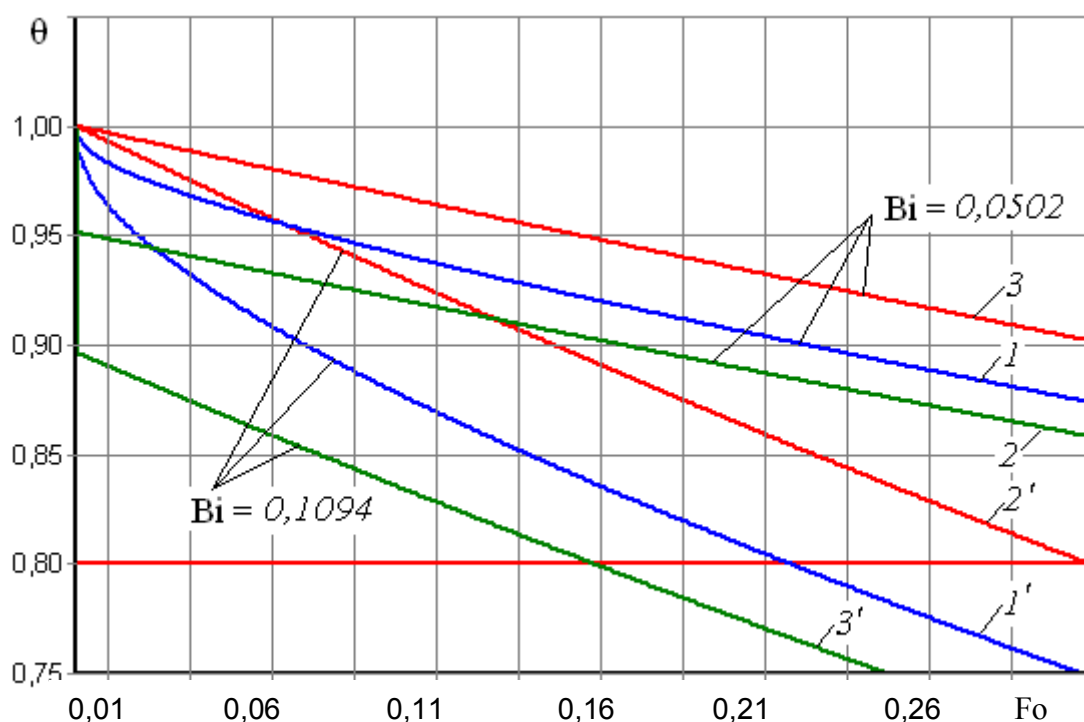


Рис. 8.18. Результаты моделирования динамики относительного уровня температуры ОЭ в предлагаемой конструкции контейнера ( $Bi = 0,0502$ ) и конструкции аналога ( $Bi = 0,1094$ ):

- 1, 1' – точное решение задачи (фактическая теплоизоляция);
- 2, 2' – решение задачи при незначительном теплообмене с окружающей средой ( $Bi \rightarrow 0$ ; практически абсолютная теплоизоляция);
- 3, 3' – в соответствии с решением задачи регулярного теплового режима [6]; ( $Fo > 0,3$ ;  $Bi \rightarrow 0$ ; теплоизоляция близка к абсолютной).

Распределение температуры в контейнере в конце периода его доставки используют в качестве начального условия при численном решении задачи в период переоснащения ОЭ.

Таблица 8.6

Температура массива ОЭ в угловых точках в зависимости  
от вида расчёта

Вид теплоизоляции	Температура $\theta$ в угловых точках массива ОЭ-2		Отклонение от точного решения задачи, % <sup>*</sup>
	Конструкция аналога	Новая конструкция	
Фактическая теплоизоляция, по формуле (8.81)	0,749	0,874	0
			0
Теплоизоляция по формуле (8.86)	0,717	0,858	– 4,27
			– 1,8
Регулярный тепловой режим по формуле (8.87)	0,800	0,902	6,81
			3,20
<i>* Верхняя строка – для конструкции аналога; нижняя – для новой конструкции</i>			

После определенного времени применения противотепловой одежды происходит фазовое превращение льда в воду и при ее температуре 293 К (плюс 20°C) ОЭ их необходимо заменить новыми, извлекая из контейнера.

Поэтому раскрытие закономерностей тепловых процессов в контейнере в период использования ОЭ в противотепловой одежде, а также использование результатов, приведенных выше, позволит определить время хранения последнего комплекта ОЭ в замороженном виде.

После доставки контейнера к месту ведения работ и извлечения комплектов ОЭ теплоизоляция верха контейнера нарушается. Верхние слои ОЭ непосредственно контактируют с вентиляционным воздушным потоком выработки. В периоды переоснащения происходит тепловая разгерметизация контейнера. Условия теплообмена на верху массива ОЭ изменяются не только в моменты разгерметизации контейнера, но и после каждого его закрытия (восстановления теплоизоляции). Это обусловлено образованием дополнительного свободного объема контейнера над массивом по окончании очередного извлечения комплектов ОЭ. Свободный объем постепенно увеличивается, заполняется тёплым воздухом и после извлечения последнего их комплекта занимает всё внутреннее пространство контейнера.

В этих условиях аналитическое решение (8.81) не может быть использовано для проведения исследований не только из-за не симметричности за-

дачи. Проблема заключается в том, что решение получено для отдельного случая: равномерного начального распределения температуры (всюду в пределах массива температура одинакова) и непрерывности функции температуры и её градиентов (тепловых потоков) на поверхности массива. Перед каждым из моментов открытия и закрытия контейнера в массиве формируется определённое температурное поле и непосредственно в эти моменты происходит скачкообразное изменение граничных условий. Следовательно, для очередных периодов разгерметизации и последующих периодов восстановления теплоизоляции контейнера должна решаться конкретная задача со своей функцией начального распределения температуры и скачкообразным изменением градиента температуры на границах. Получение аналитического решения задач в совокупности для всех периодов разгерметизации невозможно.

В связи с этим, произведем построение дискретного аналога математической модели объекта исследований для последующего численного решения задачи (8.46-8.53). Для его построения эту задачу запишем в размерных переменных. Предварительно, чтобы не использовать отрицательные значения пространственных координат, начало системы координат перенесем в передний левый нижний угол объёма параллелепипеда массива ОЭ; одну из горизонтальных осей  $0x_1$  направим по нижнему ребру левой торцевой грани; другую  $0x_2$  – по нижнему ребру передней продольной грани; вертикальную ось  $0x_3$  совместим с вертикальным ребром левой торцевой грани (рис. 8.19).

Тогда, с учётом результатов исследований, полученных выше, задачу формулируем следующим образом.

Решить дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}, \quad (\tau \geq 0; \quad 0 \leq x_i \leq H_i; \quad i = 1, 2, 3); \quad (8.88)$$

с начальным условием

$$T(x_1, x_2, x_3, 0) = T_n; \quad (8.89)$$

и граничными условиями на боках, торцах массива:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_{x_i=0} - k_i \cdot (T|_{x_i=0} - T_B) = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_{x_i=H_i} + k_i \cdot (T|_{x_i=H_i} - T_B) = 0, \quad (8.90)$$

на дне массива

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0} - k_3 \left( T|_{x_3=0} - T_B \right) = 0, \quad (\tau \geq \tau_d); \quad (8.91)$$

на верху массива в период доставки:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{x_3=H_3} + k_3 \left( T|_{x_3=H_3} + T_B \right) = 0, \quad (\tau < \tau_d); \quad (8.92)$$

на верху массива при извлечении очередного комплекта ОЭ  $\tau \in [\tau_r, \tau_r + \Delta\tau_r]$  и после очередного закрытия контейнера ( $\tau \notin [\tau_r, \tau_r + \Delta\tau_r]$ ):

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{x_3=H_3-(r-1)\cdot\Delta H_3} + \alpha_3 \cdot (T|_{x_3=H_3-(r-1)\cdot\Delta H_3} - T_B) = 0, \quad \tau \in [\tau_r, \tau_r + \Delta\tau_r]; \quad (8.93)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{x_3=H_3-r\cdot\Delta H_3} + k_{3r} \cdot (T|_{x_3=H_3-r\cdot\Delta H_3} - T_B) = 0, \quad \tau \notin [\tau_r, \tau_r + \Delta\tau_r]; \quad (8.94)$$

где  $H_i = 2 \cdot h_i$  – ширина, длина и высота массива, соответственно при  $i = 1, 2, 3$ ;

$\Delta H_3$  – высота слоя одного извлекаемого комплекта для пакетов переоснащения одежды в контейнере, м.

При этом момент первого открытия контейнера  $\tau_1$  приравняем длительности периода доставки  $\tau_d$ .

Объём массива ОЭ условно представим элементарными объёмами малых размеров  $\Delta_i$ , м, ( $i = 1, 2, 3$ ) по пространственным координатам  $x_i$  следующим образом.

Каждую из координатных осей разделим на равные отрезки  $\Delta_i$ . Концы отрезков нумеруем, начиная от 0 в направлении осей (см. рис. 8.19.а):

$$0x_1 : n = 1 \dots N; \quad 0x_2 : p = 1 \dots P; \quad 0x_3 : s = 1 \dots S, \quad (8.95)$$

где

$$N = \frac{H_1}{\Delta_1}; \quad P = \frac{H_2}{\Delta_2}; \quad S = \frac{H_3}{\Delta_3}. \quad (8.96)$$

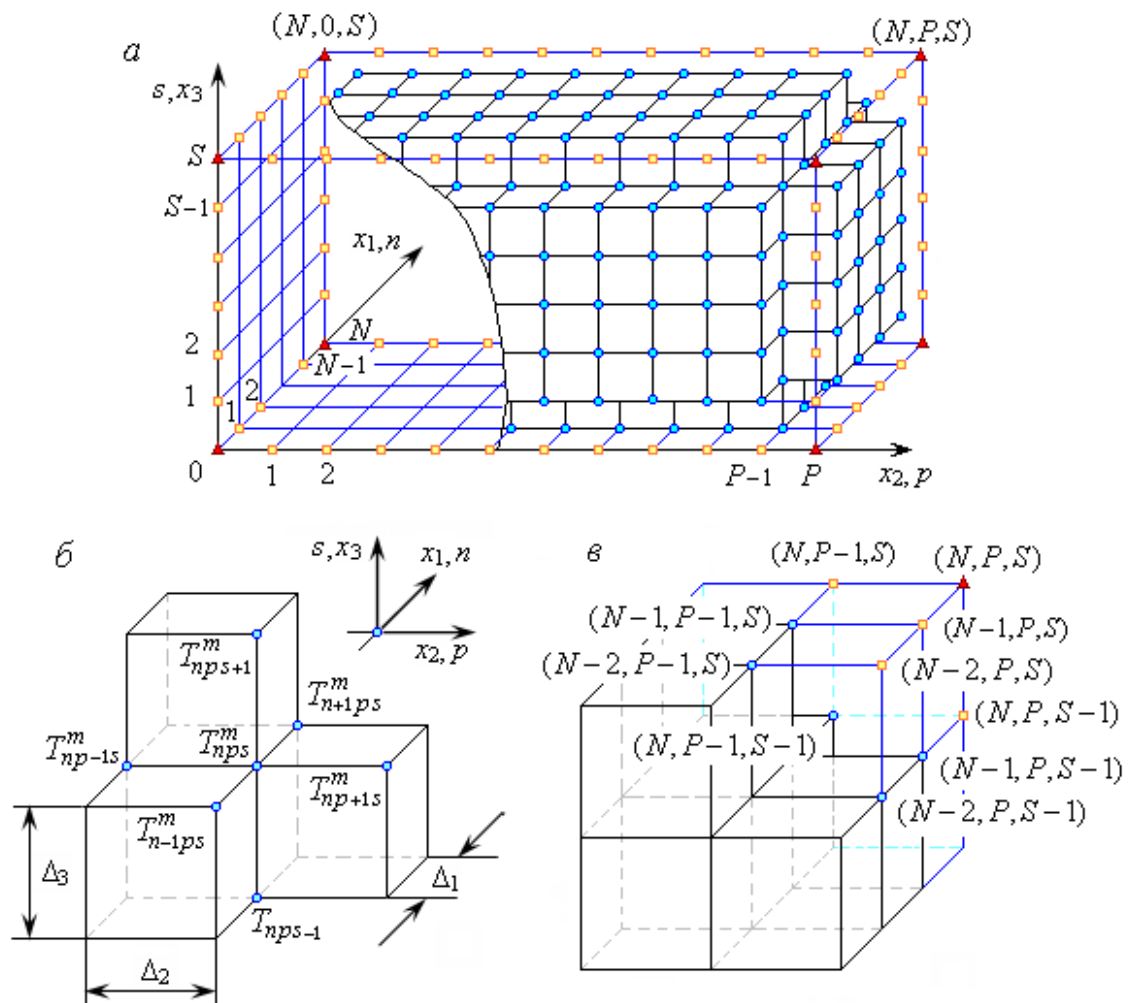


Рис. 8.19. Числовая сетка (область определения) дискретного аналога модели: а – схема разделения объёма массива на элементарные объёмы; б – схема расположения узлов, используемых на каждом итерационном шаге; в – к определению температуры в углах и на рёбрах массива;  $\bullet$  – узлы области определения;  $\square$  – узлы рёбер массива;  $\blacktriangle$  – узлы углов массива

Координатные оси представим дискретными аналогами (значениями пространственных координат на концах отрезков  $\Delta_i$ ):

$$x_1 \sim x_{1n} = n \cdot \Delta_1; \quad x_2 \sim x_{2p} = p \cdot \Delta_2; \quad x_3 \sim x_{3s} = s \cdot \Delta_3. \quad (8.97)$$

Через точки  $x_{1n}$ ,  $x_{2p}$ ,  $x_{3s}$ , дискретных аналогов координатных осей проведем вертикальные торцевые и продольные плоскости (сечения) объёма массива ОЭ; и горизонтальные плоскости (слои). В результате пересечения этих вертикальных сечений и горизонтальных слоёв образуются элементарные объёмы  $\Delta V = \Delta_1 \cdot \Delta_2 \cdot \Delta_3$ , м<sup>3</sup>, которые ещё называются контрольными объёмами.

Множество вершин элементарных объёмов, представляют собой дискретный аналог объёма массива ОЭ, и называются числовой сеткой или обла-

стью определения дискретного аналога модели. Отдельные вершины элементарных объёмов – узлы области определения дискретного аналога (см. рис. 8.19.б); размеры их рёбер  $\Delta_i$  – шаги числовой сетки. Значения температуры в произвольной точке массива представим её значениями в узлах и обозначим:

$$T(x_1, x_2, x_3, \tau) \sim T(x_{1n}, x_{2p}, x_{3s}, \tau) = T_{nps}. \quad (8.98)$$

Текущее время заменим дискретным аналогом – числом  $m$  равных промежутков времени  $\nabla$ , с :

$$\tau \sim \tau_m = m \cdot \nabla, \quad (m = 0, 1, 2, \dots, \infty), \quad (8.99)$$

а значение температуры в узле  $(n, p, s)$  в момент времени  $\tau_m$ , с, обозначим:

$$T(x_{1n}, x_{2p}, x_{3s}, \tau_m) = T_{nps}^m. \quad (8.100)$$

Производную температуры по времени аппроксимируем конечными разностями первого порядка “вперёд”, явного вида:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{T(x_{1n}, x_{2p}, x_{3s}, \tau_{m+1} + \nabla) - T(x_{1n}, x_{2p}, x_{3s}, \tau_m)}{\nabla} = \frac{T_{nps}^{m+1} - T_{nps}^m}{\nabla}. \quad (8.101)$$

Градиенты температуры – аналогичным образом:

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} \approx \frac{T_{n+1ps}^m - T_{nps}^m}{\Delta_1}; \quad (8.102)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} \approx \frac{T_{np+1s}^m - T_{nps}^m}{\Delta_2}; \quad (8.103)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_3} \approx \frac{T_{nps+1}^m - T_{nps}^m}{\Delta_3}. \quad (8.104)$$

Вторые производные заменим конечными центральными разностями второго порядка явного вида:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} \approx \frac{T_{n-1ps}^m - 2 \cdot T_{nps}^m + T_{n+1ps}^m}{\Delta_1^2}; \quad (8.105)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} \approx \frac{T_{np-1s}^m - 2 \cdot T_{nps}^m + T_{np+1s}^m}{\Delta_2^2}; \quad (8.106)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \approx \frac{T_{nps-1}^m - 2 \cdot T_{nps}^m + T_{nps+1}^m}{\Delta_3^2}. \quad (8.107)$$

Так как в данных исследованиях принято, что теплофизические свойства массива ОЭ одинаковы по всем направлениям, в дальнейшем принимаем равенство шагов числовой сетки по координатам  $\Delta_i = \Delta$ .

С учётом (8.101)-(8.107) дифференциальное уравнение (8.88) представим системой алгебраических уравнений относительно температуры  $T_{nps}^{m+1}$  на очередном временном шаге:

$$\begin{aligned} \frac{T_{nps}^{m+1} - T_{nps}^m}{\nabla} = \frac{\alpha}{\Delta^2} a \cdot & \left( T_{i-1ps}^m - 2 \cdot T_{nps}^m + T_{i+1ps}^m + \right. \\ & \left. + T_{ip-1s}^m - 2 \cdot T_{nps}^m + T_{ip+1s}^m + T_{ijp-1}^m - 2 \cdot T_{nps}^m + T_{ijp+1}^m \right) \\ & (n=1 \dots N-1; \quad p=1 \dots P-1; \quad s=1 \dots S-1), \end{aligned} \quad (8.108)$$

или в разрешённом относительно  $T_{nps}^{m+1}$  виде (см. рис. 8.19. б)

$$T_{nps}^{m+1} = F \cdot [T_{n-1ps}^m + T_{n+1p-1s}^m + T_{np+1s}^m + T_{nps-1}^m + T_{nps+1}^m + (F^{-1} - 6) \cdot T_{nps}^m], \quad (8.109)$$

где

$$F = \frac{a \cdot \nabla}{\Delta^2} - \text{сеточный аналог числа Фурье}. \quad (8.110)$$

Начальное условие (8.86) представим в виде:

$$T_{ijk}^0 = T_0; \quad \tau_m = 0. \quad (8.111)$$

Граничные условия на боках массива (8.88):

$$\lambda \cdot \frac{T_{1ps}^{m+1} - T_{0ps}^{m+1}}{\Delta} - k_1 \cdot (T_{0ps}^{m+1} - T_B) = \lambda \cdot \frac{T_{Nps}^{m+1} - T_{N-1ps}^{m+1}}{\Delta} + k_1 \cdot (T_{Nps}^{m+1} - T_B) = 0. \quad (8.112)$$

Отсюда следует

$$T_{0ps}^{m+1} = \frac{T_B + B_1 \cdot T_{1ps}^{m+1}}{1 + B_1}; \quad T_{Nps}^{m+1} = \frac{T_B + B_1 \cdot T_{N-1ps}^{m+1}}{1 + B_1}, \quad \tau_m > 0,$$

где  $B_1 = \frac{k_1 \cdot \Delta}{\lambda}$  – сеточный аналог числа Био.

Аналогично получим дискретные аналоги граничных условий на торцах, дне и верху массива в период доставки, соответственно

$$T_{n0s}^{m+1} = \frac{T_B + B_2 \cdot T_{n1s}^{m+1}}{1 + B_2}; \quad T_{nP_s}^{m+1} = \frac{T_B + B_2 \cdot T_{nP-1s}^{m+1}}{1 + B_2}, \quad \tau_m > 0, \quad (8.113)$$

$$T_{np0}^{m+1} = \frac{T_B + B_3 \cdot T_{np1}^{m+1}}{1 + B_3}, \quad \tau_m > 0; \quad T_{nP_S}^{m+1} = \frac{T_B + B_3 \cdot T_{nP_S-1}^{m+1}}{1 + B_3}, \quad \tau_m < \tau_d, \quad (8.114)$$

где  $B_2 = \frac{k_2 \cdot \Delta}{\lambda}$ ;  $B_3 = \frac{k_3 \cdot \Delta}{\lambda}$ .

На верху массива при извлечении очередного комплекта ОЭ и после очередного закрытия крышки:

$$T_{npS-(r-1)\Delta s}^{m+1} = \frac{T_B + B_{3\alpha} \cdot T_{npS-(r-1)\Delta s-1}^{m+1}}{1 + B_{3\alpha}}, \quad \tau_m \in [\tau_r, \tau_r + \Delta\tau_r]; \quad (8.115)$$

$$T_{npS-r\Delta s}^{m+1} = \frac{T_B + B_{3r} \cdot T_{npS-r\Delta s-1}^{m+1}}{1 + B_{3r}}, \quad \tau_m \notin [\tau_r, \tau_r + \Delta\tau_r], \quad (8.116)$$

где  $B_{3\alpha} = \frac{\alpha_3 \cdot \Delta}{\lambda_B}$ ;  $B_{3r} = \frac{k_{3r} \cdot \Delta}{\lambda_B}$  – (8.117)

сеточные аналоги чисел Био;

$\Delta s = \Delta H_3 / \Delta$  – число узлов сетки в пределах  $\Delta H_3$ .

Ввиду разделения объёма массива на элементарные кубические объёмы, в данной модели оказываются не задействованными узлы рёбер. Значения температуры в этих узлах определяются как средние значения температуры в ближайших узлах. Например, температура на верхнем правом ребре в узле  $(N-1, P, S)$  (см. рис. 8.19. в) приравняется полусумме температур в узлах  $(N-1, P-1, S)$  и  $(N-1, P, S-1)$ . Температура в углах массива рассчитывается по температуре в трёх ближайших узлах. Так, для узла  $(N, P, S)$

$$T_{N,P,S}^{m+1} = (T_{N-1,P,S}^{m+1} + T_{N,P-1,S}^{m+1} + T_{N,P,S-1}^{m+1}) / 3. \quad (8.118)$$



С помощью построенного дискретного аналога математической модели производим расчёт распределения температуры массива с течением времени в следующем порядке.

- задаём начальное распределение температуры в соответствии с (8.111), во всех узлах массива;
- по формуле (8.109) рассчитываем температуру на следующем временном шаге (кроме граничных узлов);
- с использованием (8.113), (8.114), определяем температуру на боках, торцах, дне и верху массива;
- вычисляем температуру на рёбрах и в угловых точках массива;
- осуществляем переход к следующему временному шагу. Если он меньше заданного периода исследований, расчёт повторяем со второго пункта, иначе его прекращаем.

Данный метод расчёта сходится при условии:  $\frac{1}{F} \geq 6$ .

В наших исследованиях, при коэффициенте температуропроводности  $a = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , принимали  $\Delta = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$ ;  $\nabla = 15 \text{ с}$ . При этом  $F = 0,162$ ;  $\frac{1}{F} = 6,17$ .

Для расчёта температуры по аналитическому выражению (8.86) и с помощью дискретного аналога в оболочке “Delphi-5” составлена программа “Windows” – “Контейнер” (файл “Kont.exe”).

Прежде всего, с помощью этой программы, проверена достоверность численного с точечным решением задачи (рис. 8.20). Отсюда следует, что в рассматриваемом временном диапазоне и чисел Био (см. табл. 8.5) результаты практически совпадают.

С помощью численного метода исследована динамика температуры в контейнере–аналоге и разработанном контейнере при температуре воздуха окружающей среды  $30^\circ\text{C}$  (рис. 8.21).

Установлено, что в контейнере-аналоге не выполняется условие (8.32) по температуре ОЭ при времени 3,25 ч (скачки кривых соответствуют моментам открытия контейнера), а в разрабатываемом контейнере температура последнего извлекаемого комплекта ОЭ равна минус  $3,7^\circ\text{C}$  при  $\tau_x = 6,0 \text{ ч}$ .

Исследована температура в верхних углах массива ОЭ, выполненных из полиэтиленовой и поливинилхлоридной пленок, где ожидается максимальное ее значение при некоторых значениях температуры и скорости воздуха окружающей среды (рис. 8.22, 8.23). При этом коэффициенты теплопроводности для материалов пленок, входящих в уравнение (8.43), приняты из теплотехнического справочника. Учитывая более высокую прочность поливинилхлоридной пленки, объем секций ОЭ полностью заполнены водой.

При прочих равных условиях (см. рис. 8.22 и 8.23) температура на поверхности последнего извлекаемого из контейнера комплекта ОЭ, оболочка которого выполнена из поливинилхлоридной пленки меняется от минус  $6,4^\circ\text{C}$  до минус  $2,7^\circ\text{C}$ , что свидетельствует о неравномерности распределе-

ния температуры. Максимальная разность температур в этом случае равна минус  $3,7^{\circ}\text{C}$ , во втором – минус  $2,3^{\circ}\text{C}$ , причем отношение минимальных температур равно 1,6.

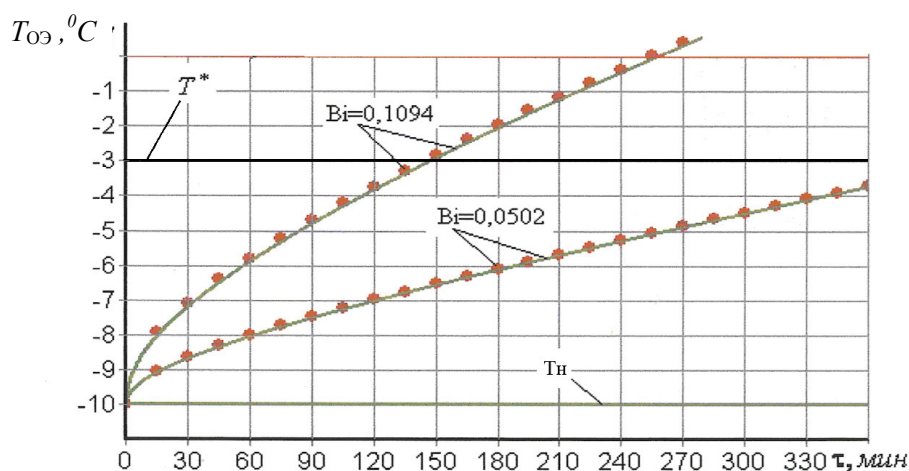


Рис. 8.20. Результаты расчёта температуры ОЭ на основании точного решения (сплошные линии) и по дискретному аналогу математической модели (точки)

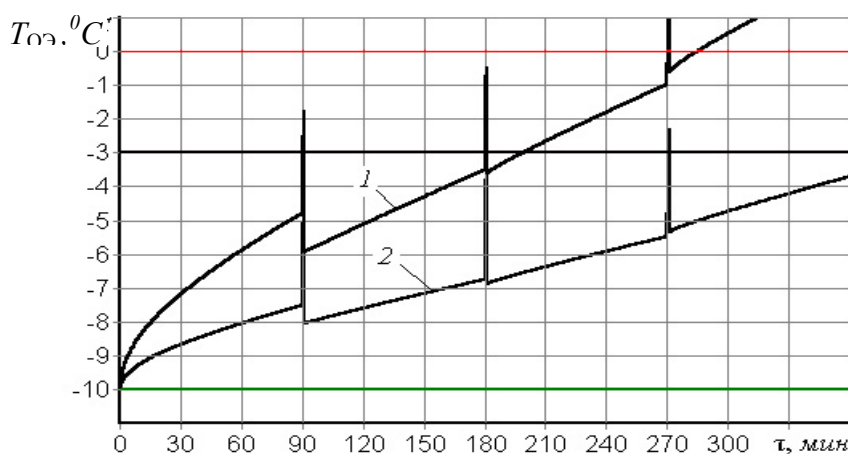


Рис. 8.21. Динамика температуры в верхних углах массива ОЭ толщиной оболочки из полиэтиленовой пленки  $0,4\text{ мм}$  ( $T_{\text{в}} = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $u = 0,5\text{ м/с}$ ): 1 – контейнера-аналога; 2 – разрабатываемого контейнера

Таким образом, в результате проведенных исследований построен дискретный аналог математической модели, адекватный точному аналитическому решению задачи, который численно реализован в виде специально разработанного программного обеспечения. В результате моделирования доказано существенное преимущество разрабатываемого переносного контейнера по сравнению с аналогом: при одинаковых условиях время хранения последней извлекаемой партии ОЭ для переоснащения одежды практически в два раза больше, чем в контейнере-аналоге. При этом, максимальная температура ОЭ, оболочка которых выполнена из поливинилхлоридной пленки в среднем в 1,7 раза ниже, чем из полиэтиленовой пленки.

При исследовании нестационарных теплообменных процессов в передвижном теплоизолирующем контейнере с водолеяными ОЭ использовали метод, изложенный выше, за исключением следующего

- контейнер находится под действием воздушного потока со всех сторон;
- контейнер должен быть вместимостью не менее 1000 шт. ОЭ (требо-

вание ГВГСС) и состоять из корпуса с верхней крышкой и тележки, позволяющей перемещать его по рельсовому пути с колеей 0,6 и 0,9 м, а также размещать в выработках сбоку от колее. Корпус и крышка должны быть трехслойными: наружный и внутренний слой – из тонкого металлического листа, средний – из теплоизолирующего материала;

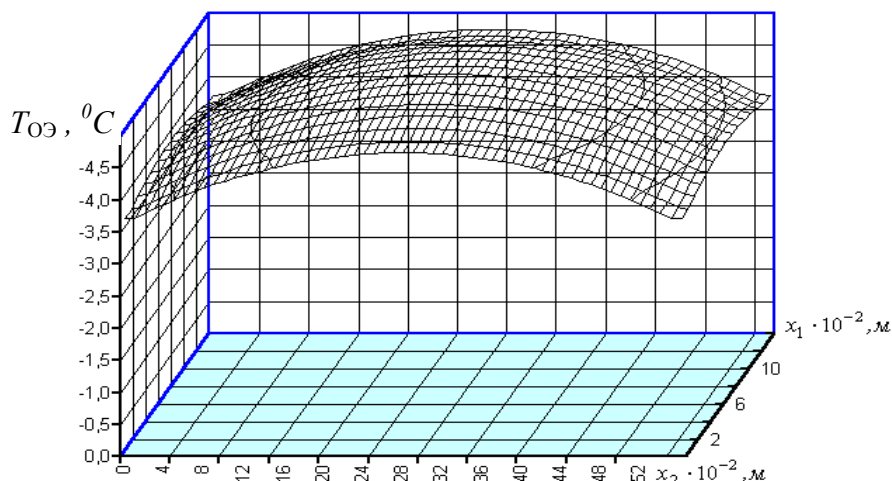


Рис. 8.22. Распределение температуры на поверхности последнего комплекта ОЭ, выполненного из полиэтиленовой пленки толщиной 0,4 мм в разрабатываемой конструкции контейнера ( $u = 5,0$  м/с;  $T_H = -10^0$ С;  $T_B = 40^0$ С).

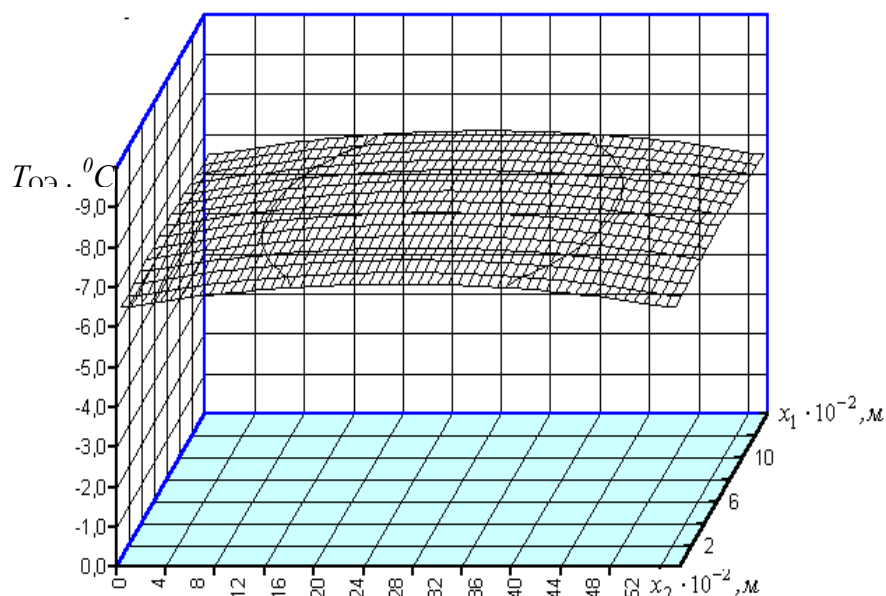


Рис. 8.23. Распределение температуры на поверхности последнего комплекта ОЭ, выполненного из поливинилхлоридной пленки толщиной 0,4 мм в разрабатываемой конструкции контейнера ( $u = 5,0$  м/с;  $T_H = -10^0$ С;  $T_B = 40^0$ С).

– в качестве теплоизолирующего слоя принят полистерол толщиной  $8 \cdot 10^{-2}$  м с параметрами  $\lambda = 3,373 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $a = 0,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, которые обес-

печивают минимальные потери теплового потока через стенки контейнера;

– при указанном коэффициенте температуропроводности принимали, что  $\Delta = 10^{-2}$  м,  $\nabla = 15$  с, что удовлетворит условию  $F^{-1} \geq 6$ , т.к.  $F^{-1} = 7.41$ .

Используя вышеприведенный метод, проведены исследования динамики температуры массива ОЭ, выполненных из полиэтиленовой и поливинилхлоридной пленок, при различных их толщинах, температуре и скорости движения воздуха окружающей среды, начальной их температуры.

Результаты одного из частных случаев: динамики температуры в верхних углах массива ОЭ, оболочка которых выполнена из полиэтиленовой (1) и поливинилхлоридной (2) пленок, при температуре воздуха  $30^{\circ}\text{C}$ , скорости его движения  $5$  м/с и начальной температуре ОЭ минус  $10^{\circ}\text{C}$  в процессе их извлечения в переносные контейнеры для переоснащения одежды (жилетов, курток, костюмов) приведены на рис. 8.24.

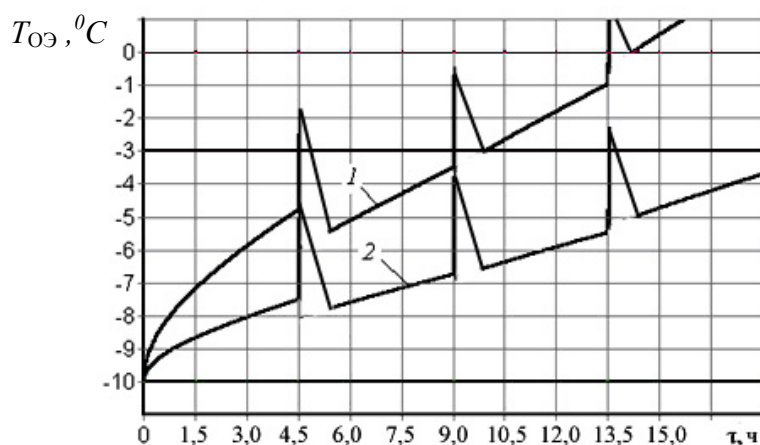


Рис. 8.24. Динамика температуры в верхних углах массива ОЭ, выполненных из полиэтиленовой (1) и поливинилхлоридной (2) пленок при  $T_{\text{в}} = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $u = 0,5$  м/с,  $T_{\text{н}} = -10^{\circ}\text{C}$

Отсюда следует, что при извлечении очередной партии ОЭ (через 4,5 ч) температура в верхних углах массива, соприкасающегося с воздухом окружающей среды, в течение этого времени резко повышается; время хранения последней партии в первом случае ( $\tau \approx 10$  ч.) при минимальной отрицательной температуре минус  $3^{\circ}\text{C}$ , необходимой для обеспечения допустимого времени защитного действия одежды, так же, как и в переносном контейнере, практически в два раза меньше, чем во втором (см. рис. 8.24).

Распределение температуры на поверхности последнего извлекаемого комплекта ОЭ при аналогичных условиях приведены на рис. 8.25 и 8.26, откуда следует, что она неравномерно распределяется по контейнеру, причем ее повышение быстрее происходит в углах торцевой стенки, находящейся под действием потока вентиляционной струи.

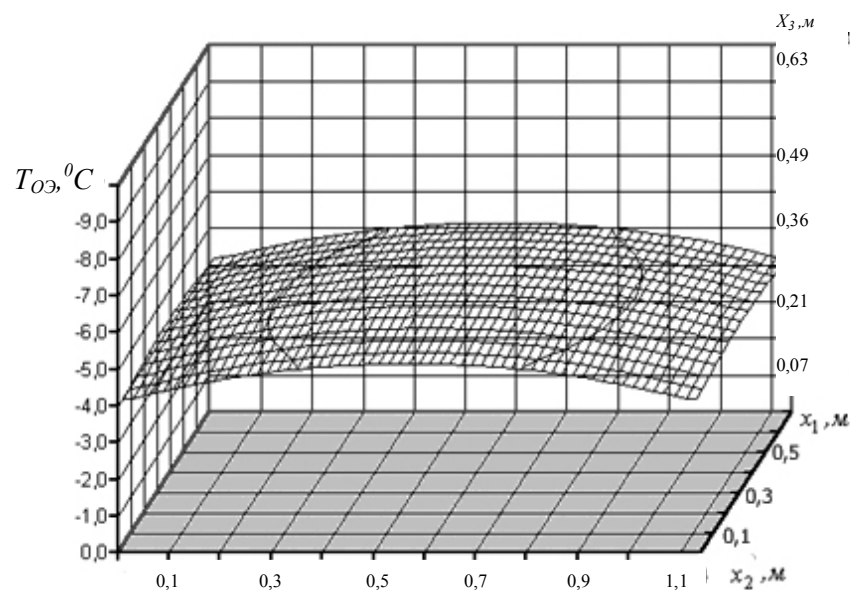


Рис. 8.25. Распределение температуры на поверхности последнего комплекта ОЭ, выполненного из полиэтиленовой пленки при  $T_{\text{в}} = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $u = 5$  м/с,  $T_{\text{н}} = -10^{\circ}\text{C}$

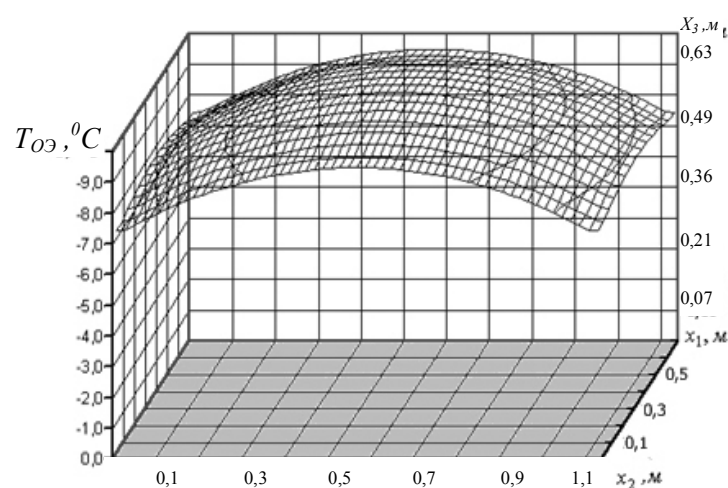


Рис. 8.26. Распределение температуры на поверхности последнего комплекта ОЭ, выполненного из поливинилхлоридной пленки при  $T_{\text{в}} = 30^{\circ}\text{C}$ ,  $u = 5$  м/с,  $T_{\text{н}} = -10^{\circ}\text{C}$

Таким образом, разработана математическая модель нестационарных процессов тепломассопереноса в передвижном контейнере (вагонетке-термосе) для доставки в горные выработки шахт, хранения и использования водолеяных ОЭ в противотепловой одежде горноспасателей и горнорабочих. На основании результатов исследований обоснованы параметры и созданы вагонетки-термосы, которые применяются горноспасателями при ведении аварийно-спасательных работ в условиях повышенной температуры.

### 8.2.3 Исследование эндотермических процессов водно–солевых растворов в охлаждающем пакете, определение их состава и массы

Как отмечено выше альтернативой использованию водоледяных ОЭ для оказания доврачебной помощи пострадавшим при перегревании и механических травмах являются пакеты, в которых холод выделяется в результате эндотермической реакции с поглощением тепла при смешивании некоторых солей (карбамида, нитрата аммония, хлоридов: кальция, аммония, калия и т.д.) с водой.

Температура такого водного раствора солей зависит от их состава, массы и температуры окружающей среды. Ее определяют, как правило, экспериментальным путем на основании большого количества трудоемких опытов, но ее можно установить и расчетным методом.

Однако, температура на наружной поверхности пакета при повышенных температурах воздуха окружающей среды должна быть минимально положительной, допустимой по санитарным нормам и обеспечить максимальное время охлаждающего эффекта пакета при минимальном их количестве.

В связи с этим, в общем виде время восстановления теплового состояния пострадавшего при перегревании,  $\tau_{\text{в}}$ , мин, функционально можно представить в виде [36-41]

$$\tau_{\text{в}} = f(T_{\text{нп}}, n_{\text{п}}), \quad (8.119)$$

$$T_{\text{нп}} = f_1(\Delta H_{\text{рс}}, m_i, T_{\text{с}}, T_{\text{рс}}, \delta, \alpha, \lambda_{\text{р}}, \lambda_{\text{т}}, \tau),$$

где  $T_{\text{нп}}$  – температура на наружной поверхности пакета, К ( $^{\circ}\text{C}$ );

$n_{\text{п}}$  – количество пакетов;

$\Delta H_{\text{рс}}$  – теплота процесса растворения химических ингредиентов, кДж/моль;

$m_i$  – масса  $i$ -го химического ингредиента, г;

$T_{\text{рс}}$  – температура раствора химических ингредиентов, К ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\delta$  – толщина теплоизолирующей оболочки пакета, мм;

$\alpha_{\text{п}}$  – коэффициент теплоотдачи окружающей среды наружной (внешней) поверхности оболочки пакета, Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ );

$\lambda_{\text{р}}$  – коэффициент теплопроводности раствора, Вт/( $\text{м} \cdot \text{K}$ );

$\lambda_{\text{т}}$  – коэффициент теплопроводности материала теплоизолирующей оболочки пакета, Вт/( $\text{м} \cdot \text{K}$ );

$\tau$  – время, с.

Для оценки эффективности охлаждающего действия водного раствора проведем расчет тепловых процессов на основании следствия из закона Гесса, в соответствии с которым тепловая химическая реакция равна сумме теплоты образования продуктов реакции за вычетом теплоты образования исходных веществ. Теплота растворения состоит из поглощаемой теплоты раз-

рушения кристаллической решетки и выделяемой молекулами растворителя теплоты сольватации (гидратации).

Охлаждающие смеси состоят из двух или нескольких твердых (и жидких) веществ, при смешивании которых происходит понижение температуры вследствие поглощения теплоты при плавлении или растворении. Исследуем, например, тепловые процессы для состава из двух химических компонентов: карбамида и нитрата аммония при растворении в воде, обладающих высокой охлаждающей способностью.

Карбамид – органическое вещество с химической формулой  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  представляет кристаллы (тонкие или плоские призмы) без запаха и цвета. Нитрат аммония – неорганическое вещество с химической формулой  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , представляющее бесцветные кристаллы, существующие в виде некоторых модификаций в зависимости от температуры. Растворение этих веществ в воде сопровождается поглощением теплоты с понижением температуры водного раствора.

На первой стадии процесса растворения веществ в растворителе (воде) происходит разрушение кристаллической решетки конденсированных соединений и переход молекул вещества в раствор. На второй стадии – процесс гидратации молекул растворяемого вещества молекулами растворителя, а в случае образования ионов в процессе электролитической диссоциации – гидратация молекулами воды ионов. Для краткости записи введем обозначения индексов: «1» – карбамид; «2» – нитрат аммония. Тогда теплота процесса растворения  $\Delta H_{\text{pc}}$ , кДж/моль, в соответствии со следствием из закона Гесса, будет равна

$$\Delta H_{\text{pc}} = \Delta H_{\text{г1}} + \Delta H_{\text{г2}} - \Delta H_{\text{ркр1}} - \Delta H_{\text{ркр2}} = \Delta H_{\text{p1}} + \Delta H_{\text{p2}}, \quad (8.120)$$

где  $\Delta H_{\text{г1}}$ ,  $\Delta H_{\text{г2}}$ ;  $\Delta H_{\text{ркр1}}$ ,  $\Delta H_{\text{ркр2}}$ ;  $\Delta H_{\text{p1}}$ ,  $\Delta H_{\text{p2}}$  – изменение теплоты веществ соответственно при гидратации, разрушении кристаллической решетки и растворении.

Для определения теплового эффекта процесса растворения карбамида и нитрата аммония в воде в соответствии с уравнением (8.120) необходимо знать теплоту растворения каждого из этих соединений в воде. В справочной литературе имеются данные по теплоте растворения этих веществ в воде. Для нитрата аммония интегральная теплота его растворения в 1 кг воды при температуре 25 °С в зависимости от числа моль соли.

Аппроксимация зависимости интегральной теплоты растворения нитрата аммония от числа моль воды на моль соли позволила установить следующую зависимость ( $R = 0,9994$ ):

$$\Delta H_{\text{pc2}} = (1,67 + 25,65x^{1,14}) / (12,14 + x^{1,14}), \quad (8.121)$$

где  $x$  – число молей нитрата аммония.

Зависимость интегральной теплоты при растворении нитрата аммония от числа моль воды на один моль соли приведена на рис. 8.27.

Начиная с числа моль воды, равного 55,55, выделяемое количество теплоты практически не зависит от количества моль воды, принимая предельное значение, равное 25,77 кДж/моль.

Теплоту растворения карбамида находили на основе данных о его растворимости в воде в диапазоне от 0 до 100 °С в 100 г воды (табл. 8.7).

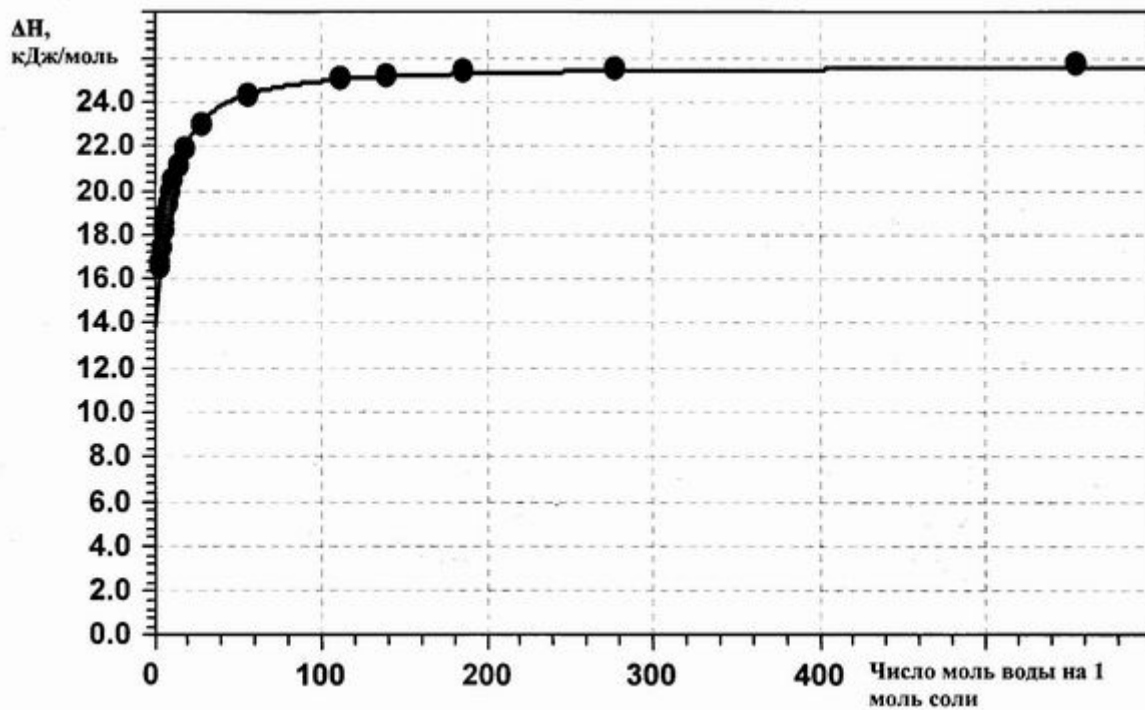


Рис. 8.27. Зависимость интегральной теплоты растворения нитрата аммония от числа моль воды на 1 моль соли

Таблица 8.7

Растворимость карбамида в воде при различных температурах

Температура, °С	0	10	20	30	40	50	60	80	100
Растворимость карбамида, г/100 г воды	67	84	104,7	135,3	165,3	205	248	400	733

Для определения теплоты при процессе растворения карбамида используем общее термодинамическое уравнение в дифференциальном виде для описания фазовых переходов – уравнение Клапейрона – Клаузиуса:

$$\Delta H_{p1} = R_{\Gamma} T^2 dT(d \ln C) \quad (8.122)$$

где  $\Delta H_{p1}$  – теплота процесса растворения карбамида, кДж/моль;

$T$  – температура, К;

$C$  – растворимость вещества, г/100 г воды.



Принимая, что в узком интервале температур теплота процесса растворения не зависит от температуры, уравнение (8.122) после интегрирования представим в виде:

$$\Delta H_{p1} = [R \ln(C_2 / C_1)] / [(T_2 - T_1) / (T_1 T_2)], \quad (8.123)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – растворимость соли при температуре  $T_1$  и  $T_2$  соответственно.

Для характерного для горных выработок температурного интервала (20...40) °С, используя данные о растворимости карбамида (см. табл. 2.4), по уравнению Клапейрона-Клаузиуса в виде (8.123) находим теплоту растворения, которая равна 17,425 кДж/моль. Для сравнения ранее приведено значение теплоты растворения 1 моль карбамида при 10,5°С в 660 моль воды, равное 15,40 кДж/моль.

Рассмотрим раствор карбамид – нитрат аммония – вода с содержанием каждого из компонентов, равного по 100 г. Пересчитаем массу каждого из компонентов на число моль, для чего значение массы 100 г разделим на молярную массу карбамида, нитрат аммония и воды, равные соответственно 60,06; 80,04 и 18 г/молей. В результате получим, что в рассматриваемом растворе содержится карбамида, нитрата аммония и воды 1,67; 1,25; 5,55 моль соответственно. Зная реальное число молей карбамида и нитрата аммония, находим тепловой эффект их совместного растворения. Тепловой эффект растворения нитрата аммония вычислим следующим образом. Определим число моль воды, приходящееся на 1 моль соли в системе:  $5,55 / 1,25 = 4,44$ . Подставив это значение в уравнение (8.121), получим значение теплоты растворения, равное 17,47 кДж/моль. Окончательно теплоту растворения нитрата аммония и карбамида с учетом числа молей каждого из компонентов получим из уравнения:

$$\Delta H_{pc} = n_1 m_1 \Delta H_1 / A_1 + n_2 m_2 \Delta H_2 / A_2, \quad (8.124)$$

где  $n_1, n_2$  – мольные доли;  $m_1, m_2$  – массы, г;  $A_1, A_2$  – молярные массы, г/моль карбамида и нитрата аммония, соответственно.

Определим мольные доли  $n_1$  и  $n_2$

$$n_1 = m_1 A_2 / (m_1 A_2 + m_2 A_1), \quad n_2 = 1 - n_1, \quad (8.125)$$

т.е.  $n_1 = 0,57$  и  $n_2 = 0,43$ .

Подставляя в уравнение (8.124) соответствующие значения, получаем  $\Delta H_{pc} = 25,98$  кДж/моль.

Теплоту в процессе растворения веществ в воде можно также рассчитать по формуле:

$$\Delta H_{pc} \text{ моль} = [(m_1 + m_2 + m_v) C_p + m_n C_n] \Delta t, \quad (8.126)$$

где  $m_v, m_n$  – масса воды и пакета соответственно, г;

$C_p, C_n$  – удельная теплоемкость полученного раствора и пакета соответственно, Дж/(г К);

$\Delta t$  – градиент температуры при растворении, К.

Из уравнения (8.126) имеем

$$\Delta t = (\Delta H_{pc} \text{ моль}) / [(m_1 + m_2 + m_b)C_p + m_n C_n]. \quad (8.127)$$

Удельная теплоемкость раствора нитрата аммония и карбамида получена экспериментальным путем, которая равна 2,94 кДж / (кг·К). Для пакета из полиэтиленовой пленки массой около 10 г теплоемкость равна 2,09 кДж/(г·К). После подстановки соответствующих значений в формулу (8.127) получим  $\Delta t = 303 \text{ К}$  (30 °С) при полной растворимости ингредиентов.

Разработанный метод расчета градиента температуры водного раствора с учетом необходимых вышеизложенных исходных данных может быть использован для растворов с различными по составу химических ингредиентов, их массы, температуры окружающей среды и начальной температуры ингредиентов.

Однако, как показали результаты экспериментальных исследований, в начальный момент времени (до 1 мин) растворения ингредиентов или после активации (приведение в действие пакета) температура раствора  $T_{\min}$  снижается в диапазоне от 269 К (минус 6 °С) до 263 К (минус 10 °С) в диапазоне температур воздуха окружающей среды от 28 °С до 22 °С, соответственно. При использовании пакета для предотвращения переохлаждения тела пострадавшего и обеспечения охлаждающего эффекта температура  $T_{\text{нп}}$  на его внешней поверхности должна быть в диапазоне от 274 К (плюс 1 °С) до 276 К (плюс 3 °С).

Поэтому выполнены исследования по выбору материала и толщины теплоизолирующей оболочки (ТИО) пакета (рис. 8.28), которые обеспечивают температуру на внешней поверхности пакета в необходимом диапазоне.

Исследовали процессы теплообмена в системе «раствор– теплоизолирующая оболочка – внешняя среда» и определяли на основе их результатов толщину и теплопроводность ТИО пакета (степень теплоизоляции раствора), при которой температура поверхности пакета не будет ниже чем 274 К (плюс 1 °С).

Математическая модель такого процесса описывается известным уравнением теплопроводности [40]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad x > 0; \quad \tau > 0 \quad (8.128)$$

с начальным условием:

$$T(x, 0) = T_{\min}, \quad 0 \leq x \leq h \quad (8.129)$$

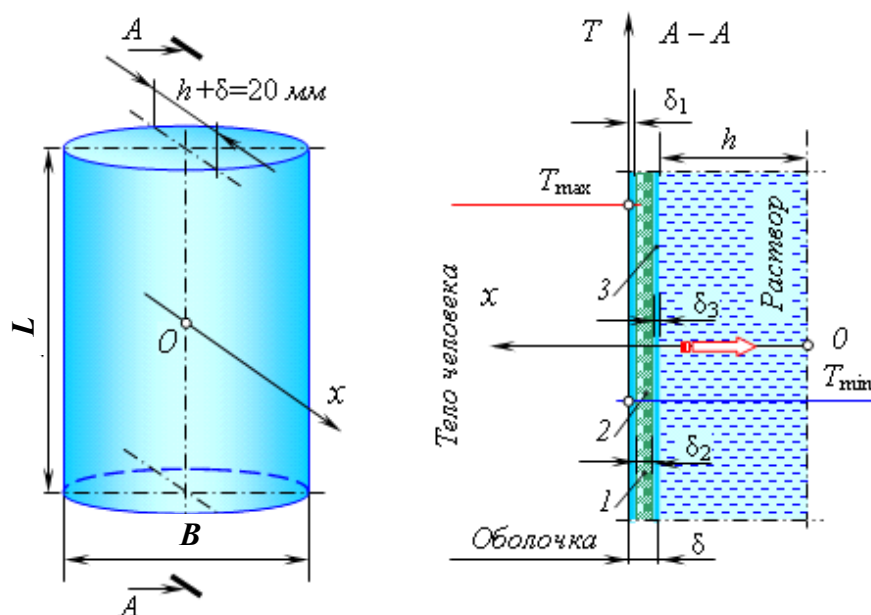


Рис. 8.28. Расчетная схема пакета (без верхней и нижней торцевых частей): 1 – внешний слой; 2 – теплоизолирующая оболочка; 3 – внутренний слой

и граничным условием:

$$\lambda_p \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} = k_k \cdot (T_c - T_{np}), \quad (8.130)$$

где  $T$  – температура раствора, К;

$\tau$  – время с момента применения пакета, с;

$x$  – пространственная координата, отсчитываемая от геометрической вертикальной оси объема пакета в срединном горизонтальном сечении пакета, где ожидается наиболее низкая температура, м;

$k_k$  – коэффициент теплопередачи окружающей среды раствора через ТИО пакета Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$h$  – половина поперечного размера пакета, м.

Ввиду симметричной постановки задачи, принимаем, что в геометрическом центре объема раствора градиент температуры отсутствует, то есть

$$\lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0. \quad (8.131)$$

Процессы теплопередачи через торцевые поверхности пакета, внешний и внутренний слои его оболочки не учитываем, поскольку торцы имеют незначительную по сравнению с боковой поверхностью, площадь, а слои – ма-

лую толщину, которой можно пренебречь. Эти допущения позволят получать расчетные величины температуры с определенным запасом надежности.

Коэффициент теплопередачи  $k_k$ , необходимый для вычисления температуры, в соответствии с теорией теплопередачи, в принятых допущениях определяется по формуле

$$k_k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\Pi}} + \frac{\delta}{\lambda_T}} = \frac{\alpha_{\Pi}}{1 + \frac{\alpha_{\Pi}\delta}{\lambda_T}}, \quad (8.132)$$

где  $\alpha_{\Pi}$  – коэффициент теплоотдачи окружающей среды внешней поверхности оболочки пакета Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\delta$  – толщина прослойки оболочки пакета, м.

Из выражения (8.132) следует, что коэффициент теплопередачи ТИО пакета всегда меньше коэффициента теплоотдачи окружающей среды, поскольку в это выражение входит число Био ( $Bi_T$ ), что характеризует соотношение между интенсивностью теплоотдачи окружающей среды и теплопередачи ТИО:

$$Bi_T = \frac{\alpha_{\Pi}\delta}{\lambda_T} > 0. \quad (8.133)$$

Температуры поверхности пакета  $T_{\Pi\Pi}$  может быть определена на основании уравнения (8.130) следующим образом. С учетом незначительной толщины оболочки, по сравнению с геометрическими размерами пакета, производная в левой части представим следующим образом:

$$\lambda_p \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=h} \approx \lambda_p \frac{T_{\Pi\Pi} - T_h}{\delta}, \quad (8.134)$$

где  $T_h = T(h, \tau)$  – температура раствора со стороны внутренней поверхности ТИО пакета, К.

После подстановки (8.134) в выражение (8.130), относительно  $T_{\Pi\Pi}$  получаем уравнение:

$$\lambda_p \frac{T_{\Pi\Pi} - T_h}{\delta} = k_k (T_c - T_{\Pi\Pi}), \quad (8.135)$$

откуда:

$$T_{\Pi\Pi} = Bi_{\delta} T_c + T_h, \quad (8.136)$$

где

$$Bi_{\delta} = \frac{k_{\kappa} \delta}{\lambda_p} - \quad (8.137)$$

число, которое характеризует соотношение между интенсивностью теплопередачи через ТИО пакета и толщину раствора.

На основании зависимости (8.135) возможная предварительная оценка искомой степени теплоизоляции раствора. Поскольку в начальный момент (после активации) должно выполняться условие  $T_{\Pi} \geq T_0$ , то следует

$$T_0 \leq Bi_{\delta} T_c + T_{\min}. \quad (8.138)$$

Следовательно, для соблюдения условия (8.138) необходимо

$$Bi_{\delta} \geq \frac{T_0 - T_{\min}}{T_c}. \quad (8.139)$$

Так при  $T_0 = 4^{\circ}\text{C} = 277\text{ K}$ ;  $T_{\min} = -8^{\circ}\text{C} = 265\text{ K}$  и  $T_c = 31^{\circ}\text{C} = 304\text{ K}$ ;  
 $Bi_{\delta} = 3,95 \cdot 10^{-2}$ .

В соответствии с (8.132) это равносильно

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\Pi}} + \frac{\delta}{\lambda_T}} \cdot \frac{\delta}{\lambda_p} \geq 3,95 \cdot 10^{-2} \quad \text{или} \quad \lambda_T \geq \frac{\delta \alpha_{\Pi} \beta \lambda_p}{\delta \alpha_{\Pi} - \beta \lambda_p}, \quad (8.140)$$

где  $\beta = 3,95 \cdot 10^{-2}$ .

Таким образом, необходимая степень теплоизоляции пакета зависит от коэффициента теплоотдачи окружающей среды его поверхности  $\alpha$ .

Учитывая, что минимальная теплопродукция организма человека при средней физической нагрузке  $q_{\text{ч}}$  составляет около  $225\text{ Вт/м}^2$ , в соответствии с законом теплообмена Ньютона:

$$q_{\text{ч}} \approx \alpha_n \cdot (T_c - T_{\min}), \quad (8.141)$$

можно оценить значение коэффициента теплообмена  $\alpha$  между телом человека и поверхностью пакета, который равен  $5,921\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ .

На основании (8.141), для этого коэффициента теплоотдачи установлено, что при толщине ТИО  $\delta = (0,45 \dots 0,50) \cdot 10^{-2}\text{ м}$  ее теплопроводность должна быть соответственно не ниже  $\lambda_T = (0,21 \dots 0,12)\text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ .

Однако эти ориентировочные значения получены для момента активации пакета и соприкосновении с телом человека. Фактически пакет находится некоторое время в теплой воздушной подвижной среде и коэффициент те-

плоотдачи  $\alpha$  значительно выше. Поэтому, для более точного определения необходимой степени теплоизоляции пакета и срока его пригодности необходимо исследовать динамику температуры раствора в период использования пакета при решении уравнений (8.128)-(8.131). Переходя аналогично (8.45) к безразмерным переменным

$$\xi = \frac{x}{h}; \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_{\min} - T_c}; \quad \text{Fo} = \frac{a\tau}{h^2} \quad (8.142)$$

эти уравнения примут следующий вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial (a \cdot \text{Fo})} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2}, \quad 0 \leq \xi < 1; \quad \text{Fo} > 0; \quad (8.143)$$

$$\theta(\xi, 0) = \theta_0 = 1; \quad (8.144)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = 0; \quad (8.145)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} + \text{Bi} \theta_{\Pi} = 0, \quad (8.146)$$

где

$$\text{Bi} = \frac{k_{\kappa} h}{\lambda_p} \quad (8.147)$$

число Био;  $\theta_{\Pi} = \theta|_{\xi=1}$  – безразмерная величина температуры на поверхности пакета, с учетом того, что в принятых допущениях при незначительной толщине оболочки  $T_{\Pi\Pi} \approx T(h, \tau)$ .

Решение задачи (8.143) - (8.146) находим с помощью метода разделения переменных Фурье и имеет аналогичный вид (8.73).

Используя выражения (8.78), (8.79) для определения  $\sin \mu_n$ ,  $\cos \mu_n$  с учетом равенства  $C_1=1$  и  $C_n=0$  ( $n>1$ ), выражение для температуры (8.85) примет вид:

$$\theta = \cos \left( \sqrt{\text{Bi}} \xi \right) e^{-\text{Bi} \text{Fo}}, \quad (8.148)$$

а поскольку это решение задачи об охлаждении раствора, то в дальнейшем принимаем решение:

$$\theta_T = 1 - \cos(\sqrt{\text{Bi}} \xi) e^{-\text{Bi} \text{Fo}}. \quad (8.149)$$

Величину  $\text{Bi}$  в данных исследованиях оценивали по полученным выше значениям :  $\alpha_{\text{п}} = 5,921 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $h = 0,01 \text{ м}$ ;  $\delta = 0,0045 \text{ м}$ ;  $\lambda_{\text{р}} = 0,60 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Согласно формуле (2.130) вычисляется коэффициент теплопередачи, который равняется  $k_{\text{к}} = 5,254 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а затем по (8.147)  $\text{Bi} = 0,0875$ .

Результаты расчета относительной температуры раствора в зависимости от числа  $\text{Fo}$  при разных  $\text{Bi}$  представлены на рис. 8.29.

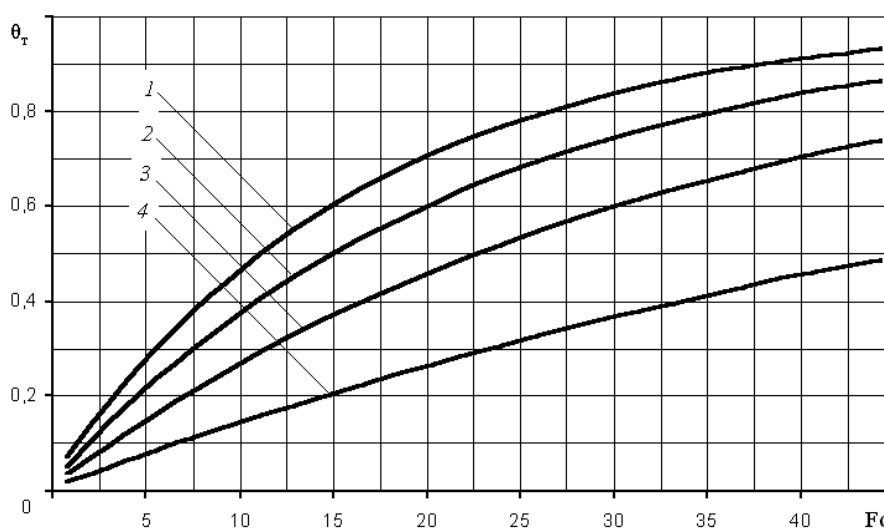


Рис. 8.29. Результаты моделирования динамики температур раствора  
1 –  $\text{Bi} = 0,60$ ; 2 –  $\text{Bi} = 0,45$ ; 3 –  $\text{Bi} = 0,30$ ; 4 –  $\text{Bi} = 0,15$

На основании проведенных исследований: разработана математическая модель динамики температуры на поверхности охлаждающего пакета; получены аналитические зависимости температуры пакета от начальной температуры и температуропроводности раствора, теплопроводности ТИО пакета и температуры окружающей среды.

Установлено, что для соблюдения санитарных норм к температуре поверхности пакета теплопроводность его ТИО должна быть в пределах  $(0,12 \dots 0,25) \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , а толщина –  $(2 \dots 4) \text{ мм}$ .

### 8.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ОХЛАЖДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ КОНТЕЙНЕРОВ

#### 8.3.1. Общие сведения

Целью проведения экспериментальных исследований является подтверждение адекватности полученных результатов теоретических исследований, определения исходных данных для расчета напряженно-деформированного состояния водяного ОЭ, количества (многократности) его использования в одежде, а также времени восстановления теплового состояния пострадавших при перегревании, используя пакеты с водно-соляной смесью.

В работе рассматриваются механические, теплообменные (водоледяной ОЭ) и теплообменные (переносной и передвижной теплоизолирующие контейнеры, химический охлаждающий пакет) процессы, происходящие в изделиях различного назначения. Методики проведения экспериментальных исследований, а также методы теоретических исследований существенно отличаются друг от друга, т.е. общая методика этих исследований не поддается обобщению. Поэтому ниже они приведены совместно с результатами исследований вышеуказанных процессов по изделиям отдельно.

#### 8.3.2. Методика проведения и исследование напряженно-деформированного состояния оболочки водолеяного ОЭ

Для определения параметров ползучести  $\chi$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\varepsilon_0$  (см. подраздел 8.2), а также предельных значений напряжений  $\sigma_n$  на растяжение и разрыв сварных швов в зависимости от количества замораживаний  $N$ , исследовали напряженно-деформированное состояние образцов, вырезанных из серийно выпускаемой в Украине полиэтиленовой пленки толщиной 0,2 мм и 0,4 мм и поливинилхлоридной – 0,4 мм замороженных ОЭ в камерах морозильных установок «Норд» и Зима-А при температурах минус 20 °С и минус 60 °С, соответственно.

Основные технические характеристики пленок, используемые в экспериментальных исследованиях, приведены в табл.8.8.

Учитывая более высокие прочностные свойства поливинилхлоридной пленки по сравнению с полиэтиленовой, а также низкий температурный коэффициент линейного удлинения, объемы секций ОЭ в первом случае полностью заполняли водой.

Для исследований использовали два варианта испытаний: на растяжение одинарной пленки; на расслоение швов. Испытания проводили на специально разработанном стенде (рис. 8.30).



Основные технические характеристики  
полиэтиленовой и поливинилхлоридной пленок

Наименование показателя и его размерность	Значение показателя	
	Полиэтиленовая пленка	Поливинилхлорид- ная пленка
Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$0,92 \cdot 10^3$	$1,14 \cdot 10^3$
Максимальное относительное удлинение, $\delta$ , %	550	90
Температурный коэффициент линейного удлинения, $\alpha_0$ , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Разрушающая напряжения (предел прочности) при растяжении, $\sigma_{\text{в}}$ , МПа	12	80
Модуль упругости при растяжении (температура воздуха 20 $^{\circ}\text{C}$ ), $E$ , МПа	$2,5 \cdot 10^2$	$3,0 \cdot 10^3$

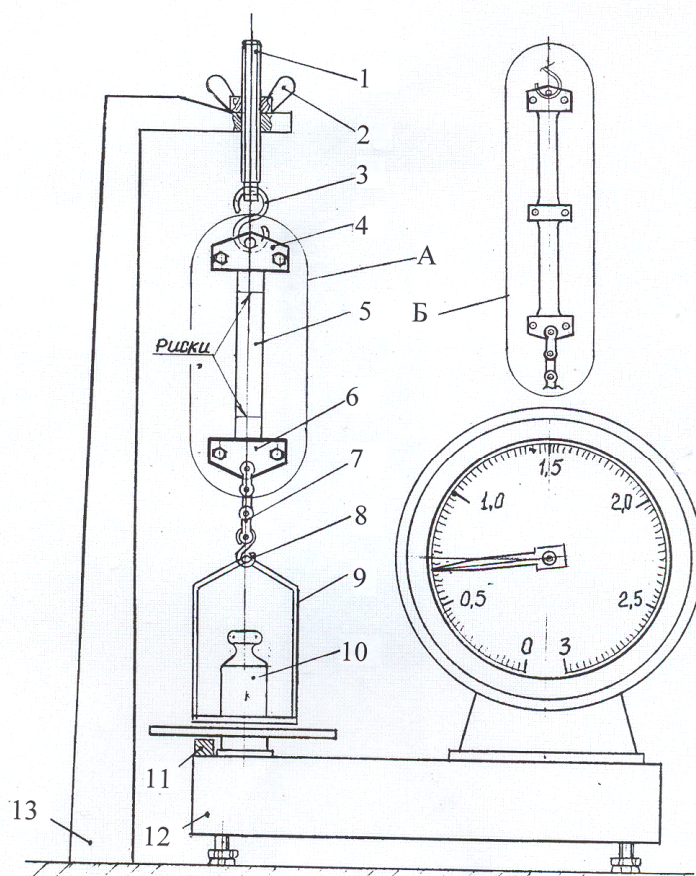


Рис. 8.30. Стенд для испытаний образцов водолеяных ОЭ:

- 1 – винт натяжной; 4, 6 – верхняя и нижняя клипсы; 5 – образец;  
7 – цепь; 9 – платформа весовая; 10 – гиря; 11 – упор ограничительный;  
12 – веса; 13 – стойка

Образец 5 крепили в нижней и верхней клипсах (вариант крепления А), а груз в виде гири 10 устанавливали на платформе 9. Вариант крепления Б использовали для одновременных исследований образцов, вырезанных из замороженных ОЭ и образцов ампул, находящихся в камере морозильной установки.

Масса составных частей 6-10 стенда равнялась 0,7 кг и являлась первоначальной нагрузкой для образцов, дополнительную нагрузку создавали с помощью гирь различной массы.

Образцы для определения прочностных характеристик вырезали вдоль образующей оболочки, а для проверки сварных швов – в поперечном направлении ОЭ с предварительным расслоением одного шва.

Для измерения перемещений образцов пленок (измерение расстояния между рисками) использовали оптический (лазерный) датчик перемещения (ZETLab) с чувствительностью не превышающей 0,01 мм, а их толщину микрометр МК0 – 25 мм с погрешностью 0,004 мм, ГОСТ 6507-78.

Исследования проводили в следующей последовательности. Два элемента ОЭ (с водой) и две ампулы без воды, выполненных из полиэтиленовой пленки толщиной 0,2 мм, помещали в холодильную камеру морозильной установки и после замораживания ОЭ до температуры минус  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ , измеряемую пирометром, вынимали из камеры, доводя температуру оболочек ОЭ и ампул до плюс  $20 ^\circ\text{C}$ , при которой прекращается его использование в противотепловой одежде. Образцы из ампул предназначены для определения возможности сокращения времени проведения испытаний. Исследования для определения деформаций и площади поперечного сечения образцов на растяжение с постоянной нагрузкой проводили в течение 20 ч, а для определения предельных напряжений и напряжений на разрыв швов – с дополнительной нагрузкой.

Предварительные результаты исследований показали, что деформации и предельные значения напряжений для образцов, вырезанных из замороженных ОЭ, и образцов ампул, находящихся в морозильных установках, существенно отличаются, поэтому в дальнейшем исследования проводили на первых образцах. Сначала исследования провели при различных количествах замораживаний и размораживаний ОЭ, оболочки которых выполнены из полиэтиленовой пленки толщиной 0,2 мм и 0,4 мм, поливинилхлоридной – 0,4 мм при температуре замораживания минус  $20 ^\circ\text{C}$ , затем – при минус  $60 ^\circ\text{C}$ .

Принцип построения кривых ползучести заключается в следующем. На графике семейства кривых ползучести выбираем интервал времени  $\Delta t$ , соответствующий стадии ползучести и для каждого количества замораживаний определяем приращение деформации ползучести  $\Delta \varepsilon_1, \Delta \varepsilon_2, \dots, \Delta \varepsilon_n$  за выбранный интервал времени  $\Delta t$ . По величине  $\Delta \varepsilon$  и  $\Delta t$  определим скорость ползучести для каждого количества замораживаний ( $\dot{\varepsilon} = \Delta \varepsilon / \Delta t$ ) и строим график, отражающий зависимость скорости ползучести от величины напряжений.

Используя общеизвестные математические методы обработки средних значений результатов экспериментов и построения динамики деформаций от

времени для образцов из полиэтиленовой пленки толщиной 0,2 мм и 0,4 мм, поливинилхлоридной пленки – 0,4 мм, получены результаты исследований, которые для  $\varepsilon = f(t)$  приведены соответственно на рис. 8.31-8.33.

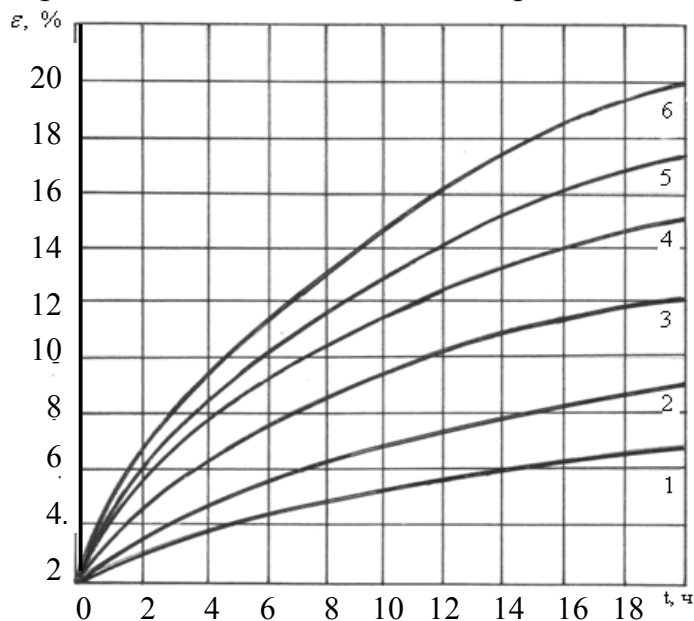


Рис. 8.31. Зависимость деформаций образцов полиэтиленовой пленки толщиной 0,2 мм от времени и количества замораживаний ( $N_3$ ) ОЭ: 1, 4, 5, 6 –  $N_3=10, 40, 50, 60$  ( $T_0$  – температура минус  $20^\circ\text{C}$ ); 2, 3 –  $N_3=20, 30$  ( $T_0$  – минус  $60^\circ\text{C}$ )

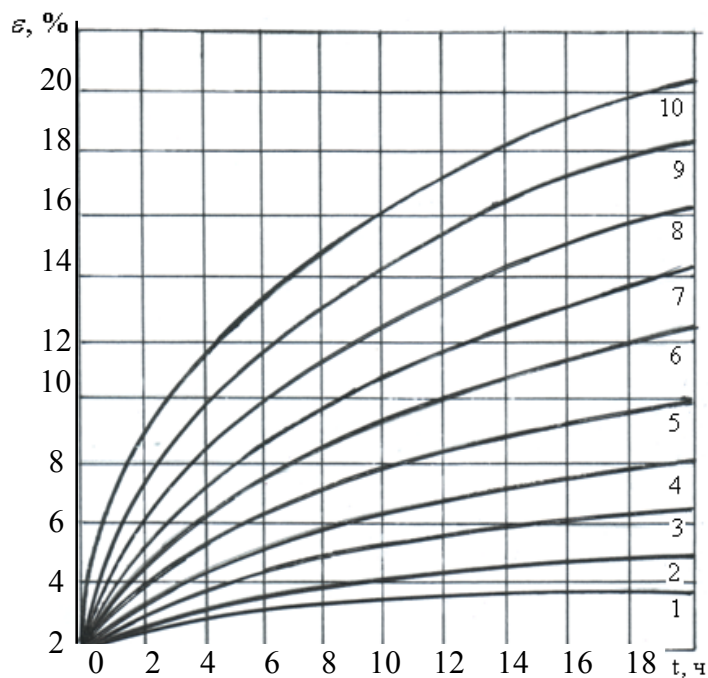


Рис. 8.32. Зависимость деформаций образцов полиэтиленовой пленки толщиной 0,4 мм от времени и количества замораживаний ( $N_3$ ) ОЭ: 1, 5, 8, 10 –  $N_3=10, 30, 60, 100, 130$  ( $T_0$  – минус  $20^\circ\text{C}$ ); 2, 4, 6, 7, 9 –  $N_3=10, 20, 40, 50, 60$  ( $T_0$  – минус  $60^\circ\text{C}$ )

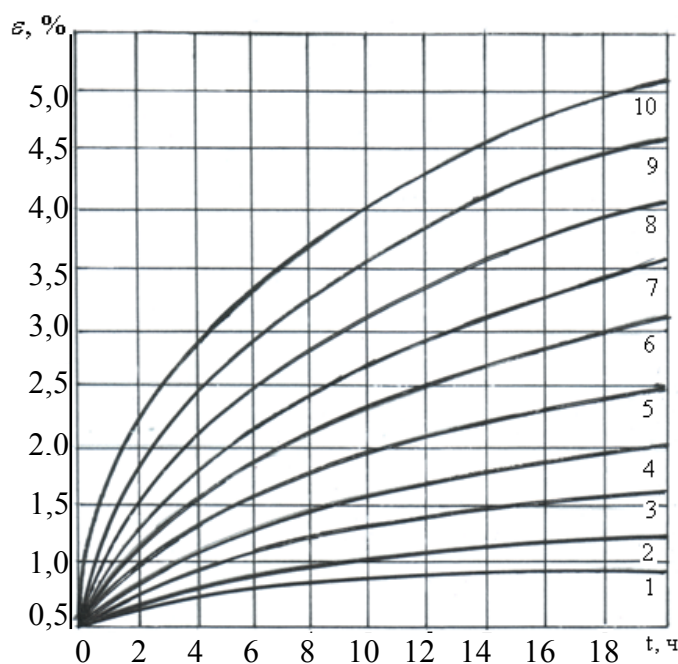


Рис. 8.33. Зависимость деформаций образцов поливинилхлоридной пленки толщиной 0,4 мм от времени и количества замораживаний ( $N_3$ ) ОЭ:  
 1, 3, 5, 7, 10 –  $N_3 = 30, 90, 150, 230, 330$  ( $T_0$  – минус 20 °C);  
 2, 4, 6, 8, 9 –  $N_3 = 20, 50, 90, 130, 180$  ( $T_0$  – минус 60 °C)

Анализ полученных результатов показывает, что общим для  $\varepsilon = f(t)$  является нелинейная зависимость с мгновенным ростом этих величин на незначительном участке, что характерно для материалов из пластмасс, рост деформаций во времени, т.е. имеет место ползучесть. При этом имеет место практически пропорциональная зависимость деформаций от количества выбора ОЭ, что дала возможность существенно сократить количество опытов. Напряжения на разрыв швов меняются незначительно и не достигают своего предельного значения.

При исходных данных: времени  $t = 20$  ч,  $E = 2,5 \cdot 10^2$  МПа,  $E_\infty = 10^2$  МПа для полиэтиленовой и  $E = 3,0 \cdot 10^3$  МПа,  $E_\infty = 1,2 \cdot 10^3$  МПа для поливинилхлоридной пленок, т.е. имеет место пропорциональность их изменений при различных деформациях, и переходя от изображения Лапласа к оригиналу получили следующие значения для реологических параметров –  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta = 0,22$ ,  $\chi = 0,13$ .

Проведен расчет максимальных напряжений  $\sigma_z$  по формулам (8.2), (8.3) с заменой коэффициента  $B_0$ , выраженного через упругие постоянные, линейными операторами Вольтерра (8.15), в свою очередь выражающиеся через функцию Ю. Н. Работнова, зависящую от времени  $t$ .

Программа вычисления напряжений дополнена подпрограммой, вычисляющей функцию  $\mathcal{E}_\alpha^*$  по асимптотической формуле (8.23, см. подраздел 8.2.1) на основании ранее определенных параметров ползучести.

Результаты выполненных исследований представлены на рис. 8.34 и 8.35, где сплошными линиями обозначены максимальные напряжения  $\sigma_z$ ,

возникающие в оболочке ОЭ в результате многократного их замораживания и полученные расчетным путем, а штриховыми – предельные ее напряжения  $\sigma_v$  в результате обработки данных экспериментов.

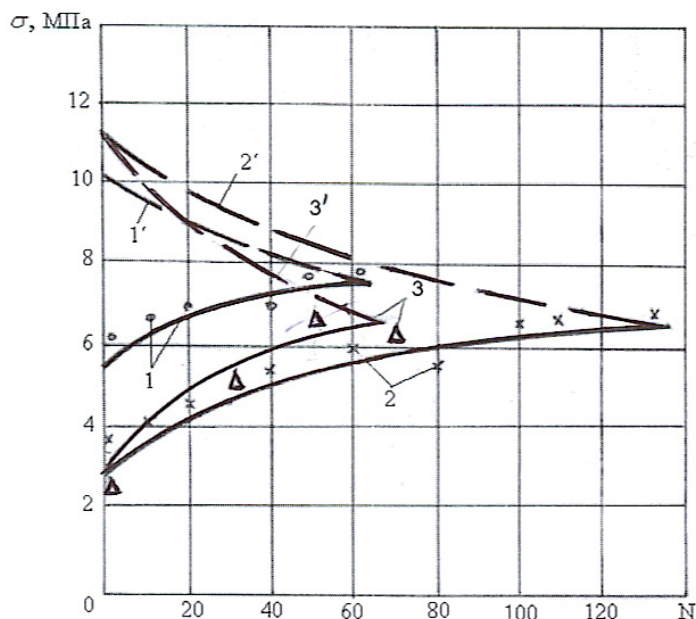


Рис. 8.34. Зависимость максимальных  $\sigma_z$  (1, 2, 3) и предельных  $\sigma_v$  (1', 2', 3') напряжений в полиэтиленовой пленке ОЭ от количества замораживаний ( $N_z$ ), начальной температуры ( $T_0$ ) и толщины ( $\delta$ ): 1, 2 –  $\delta = 0,2$  мм,  $T_0$  – минус  $20^\circ\text{C}$ ; 1', 2' –  $\delta = 0,4$  мм,  $T_0$  – минус  $20^\circ\text{C}$ ; 3, 3' –  $\delta = 0,4$  мм,  $T_0$  – минус  $60^\circ\text{C}$ ; —,  $\circ$ ,  $\times$ ,  $\Delta$  – экспериментальные данные

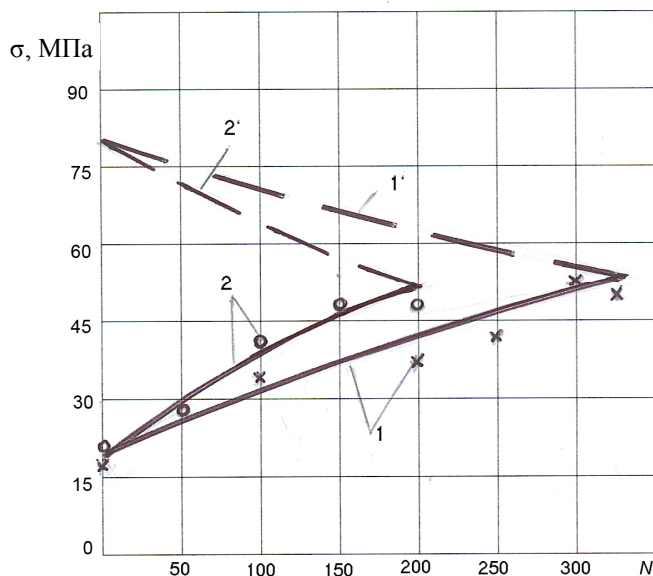


Рис.8.35. Зависимость максимальных напряжений  $\sigma_z$  (1, 2) и предельных  $\sigma_v$  (1', 2') напряжений в поливинилхлоридной пленке ОЭ толщиной 0,4 мм от количества замораживаний ( $N_z$ ) и начальной температуры ( $T_0$ ): 1, 1' –  $T_0$  – минус  $20^\circ\text{C}$ ; 2, 2' –  $T_0$  – минус  $60^\circ\text{C}$ ; —,  $\circ$ ,  $\times$  – экспериментальные данные.

На основании анализа полученных результатов следует:

- максимальная погрешность расчетных напряжений и данных экспериментов не превышает 10 %;
- нелинейная зависимость напряжений в полиэтиленовой пленке с увеличением максимальных их значений при увеличении количества замораживаний ОЭ и практически линейная – в поливинилхлоридной пленке;
- при температуре замораживания ОЭ минус 60 °С прочность пленок по сравнению с температурой минус 20 °С снижается практически в два раза;
- прочность полиэтиленовой пленки ОЭ толщиной 0,40 мм по сравнению с существующей – 0,15 мм и 0,20 мм увеличивается соответственно в десять и два раза, а прочность поливинилхлоридной пленки ОЭ увеличивается ( $N_z = 330$ ) в 2,5 раза по сравнению с полиэтиленовой пленкой ( $N_z = 130$ ) при толщинах 0,40 мм и более, чем в двадцать раз по сравнению с существующей толщиной 0,15 мм.

При использовании ОЭ, оболочка которых выполнена из поливинилхлоридной пленки толщиной 0,40 мм, а объем секций полностью заполнены водой, масса противотепловой одежды в зависимости от их количества увеличится незначительно. Так, в охлаждаемом жилете – на 0,4 кг, в куртке ТК-50 – на 0,5 кг, в костюмах – от 0,6 до 0,7 кг.

Таким образом, результаты исследований наследственного напряженно-деформированного состояния оболочек позволяют определить, в конечном счете, срок эксплуатации водолежных ОЭ, изготавливаемых из пленок различных марок в зависимости от их плотности, механических характеристик, толщины, температуры и количества замораживаний, а также существенно повысить безопасность труда и эффективность ведения аварийно-спасательных работ, снизить затраты на средства индивидуальной противотепловой защиты.

### 8.3.3. Методика проведения и исследование динамики температуры водолежных ОЭ в теплоизолирующих контейнерах, определение времени их хранения

Для определения адекватности математической модели теплообменных процессов в системе «окружающая среда – переносной (передвижной) теплоизолирующий контейнер - водолежные ОЭ» (см. подраздел 2.2), а также основной эксплуатационной характеристики – времени хранения ОЭ при переносе в противотепловой одежде, исследования проводили в тепловой камере НИИГД «Респиратор» с участием пяти испытуемых (горноспасателей) при сертификационных испытаниях противотепловых курток ТК-50. При этом использовали переносной контейнер-сумку.



В тепловой камере создавали следующие условия: температура воздуха  $(30 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$ , влажность  $(98 \pm 2) \%$ , скорость движения  $(0,5 \pm 0,1) \text{ м/с}$ .

Испытаниям подвергали контейнер (вместимость 60 шт. ОЭ) с двойными слоями пенополиэтилена, между которыми находится воздушная прослойка, с прорезиненной тканью, расположенной в верхней его части (см. подраздел 8.2.2, вариант 5). При этом использовали водолежные ОЭ с полиэтиленовой и поливинилхлоридной оболочкой толщиной 0,4 мм, обеспечивающими более высокую многократность их применения, а испытатели четыре раза меняли в противотепловой куртке по 15 ОЭ в течение 90 мин.

Замораживания ОЭ проводили в установке «Интер-300», а измерения начальной их температуры в контейнере, во время хранения и после извлечения очередной партии проводили с помощью пирометра с абсолютной погрешностью  $0,5 ^\circ\text{C}$ .

Испытатели выполняли работу в куртках согласно ТУ 12.43.01.180-86. Куртка противотепловая ТК-50.

Результаты исследований динамики температуры ОЭ в контейнере, выполненных из полиэтиленовой и поливинилхлоридной пленок толщиной 0,40 мм, приведены в таблице 8.9.

Следует отметить, что заполнение ОЭ в контейнер испытатели проводили в течение трех мин.

Анализ данных экспериментальных исследований, приведенных в таблице 8.2, показывает, что начальная температура ОЭ с двумя типами пленок практически одинаковая. После извлечения первой партии (через 90 мин) за счет поступления воздуха в контейнер из окружающей среды температура незначительно повышается, выполняя функцию теплоизолятора, охлаждаясь верхними слоями ОЭ. Градиент повышения температуры их оболочки из полиэтиленовой пленки значительно выше, чем из поливинилхлоридной: в первом случае температура ОЭ через 360 мин достигает минус  $3 ^\circ\text{C}$ , во втором – через 600 мин, что обеспечивает больший запас их холода в 1,7 раза при использовании в противотепловой одежде. Относительная погрешность по сравнению с результатами теоретических исследований составляет 11 % (см. рис. 8.21), где  $\tau = 400$  мин.

Это дает возможность уменьшить количество используемых переносных контейнеров, а, следовательно, снизить затраты на ведение аварийно-спасательных работ в условиях повышенной температуры. В результате испытаний курток ТК-50 при увеличении их массы на 0,5 кг время защитного действия увеличилось с 150 мин до 188 мин, т.е. на 25 %.

Таким образом, обоснованы параметры нового теплоизолирующего контейнера – сумки для доставки к месту ведения работ и хранения водолежных ОЭ, оболочка которых выполнена из поливинилхлоридной пленки толщиной 0,40 мм, с минимально возможной массой и максимальным временем их хранения, что позволяет повысить безопасность труда и эффективность аварийно-спасательных работ в противотепловой одежде.

Динамика температуры водоледяного ОЭ в переносном контейнере при скорости воздуха в тепловой камере  $u = 0,5$  м/с и температуре  $30^{\circ}\text{C}$

№ п/п	Время измере- ний, мин	Температура, $^{\circ}\text{C}$			
		Толщина полиэтиленовой плен- ки $\delta = 0,40$ мм		Толщина поливинилхлорид- ной пленки $\delta = 0,40$ мм	
		Начальная	Текущая	Начальная	Текущая
1	0	- 18,2	- 9,8	- 18,0	- 9,8
2	30		- 9,3		- 9,5
3	60		- 8,5		- 9,2
4	90		- 7,7		- 8,9
5	120		- 7,5		- 8,5
6	150		- 7,0		- 8,1
7	180		- 6,5		- 7,8
8	210		- 6,2		- 7,7
9	240		- 5,8		- 7,6
10	270		- 5,2		- 7,4
11	300		- 4,8		- 7,0
12	330		- 4,0		- 6,6
13	360		- 3,0		- 6,2
14	390		-		- 5,8
15	420		-		- 5,4
16	450		-		- 5,0
17	480		-		- 4,6
18	510		-		- 4,4
19	540		-		- 3,8
20	570		-		- 3,4
24	600		-		- 3,0

Аналогичные экспериментальные исследования по определению времени хранения водоледяных ОЭ, изготовленных из поливинилхлоридной пленки толщиной 0,40 мм, в передвижном теплоизолирующем контейнере (вагонетке-термосе) требуют значительных материальных затрат на его изготовление, использование большого количества ОЭ, а также времени проведения исследований. В связи с этим, для исследования динамики температуры ОЭ перейдем к физической модели такого контейнера, используя метод моделирования тепловых процессов.

Дифференциальное уравнение теплопроводности в случае постоянных параметров ОЭ можно записать в виде [32]

$$\partial t / \partial \tau = a \nabla^2 t, \quad (8.150)$$

где  $t$  – текущая температура ОЭ, К;



$\tau$  – время, с;

$\nabla = \partial / \partial x + \partial / \partial y + \partial / \partial z$  – оператор Лапласа;

$x, y, z$  – координаты, м.

Приведенное уравнение (8.150) описывает бесконечное множество рассматриваемых тепловых процессов. Чтобы из целого класса явлений выделить единичное явление, необходимо к этому уравнению присоединить начальные и граничные условия, а также задать значение коэффициента температуропроводности  $\alpha$ .

Начальное условие должно представлять собой распределение температур во всей исследуемой области для момента времени  $\tau = 0$  и может быть записано в виде

$$t_{\text{нач}} = t^*, \quad (8.151)$$

где  $t^*$  – известная температура в фиксированной точке контейнера с координатами  $x = x^*, y = y^*, z = z^*$  в начальный момент времени.

Граничные условия могут быть заданы в виде равенства тепловых потоков на поверхности контейнера.

$$-\lambda(\partial t / \partial n)_{\text{пов}} = \alpha(t)_{\text{пов}}, \quad (8.152)$$

где  $n$  – внешняя нормаль к поверхности контейнера.

Для установления подобия процессов в рассматриваемом случае необходимо дифференциальные уравнения, начальные и краевые условия привести к безразмерному виду и обеспечить равенство безразмерных параметров, начальных и краевых условий. Введем следующие масштабные преобразования [30]

$$\begin{aligned} x &= l_0 X; & \tau &= \tau_c T^0; \\ y &= l_0 Y; & t &= t_0 T; \\ z &= l_0 Z; & n &= l_0 N; \\ a &= l_0 A; & t^* &= t_0 T^*; \\ \alpha &= \alpha_0 A^0; & t_{\text{нач}} &= t_0 T_{\text{нач}}; \\ \lambda &= \lambda_0 \Lambda, \end{aligned} \quad (8.153)$$

где величины, отмеченные индексом «нуль», являются размерными масштабами, выбор которых вначале произволен.

После введения преобразований (8.153) в уравнения (8.150), (8.152) получаем

$$\left[ \frac{t_0}{\tau_0} \right] \frac{\partial T}{\partial T^0} = \left[ \frac{t_0 \alpha_0}{l_0^2} \right] A \nabla^2 T \quad (8.154)$$

при  $T^0 = 0$  и  $T_{\text{нач}} = T^*$ . (8.155)

На поверхности

$$- [\lambda_0 t_0 / l_0] \Lambda (\partial T / \partial N)_{\text{пов}} = [t_0 \alpha_0 A^0] (T_{\text{пов}}), \quad (8.156)$$

Причем  $A^0 = f(X_r, Y_r, Z_r, A, \Lambda, T^0)$ . (8.157)

Чтобы уравнения (3.6) и (3.8) стали безразмерными, необходимо принять

$$1/\tau_0 = a_0 / l_0 \text{ и } \alpha^0 = \lambda_0 / l_0. \quad (8.158)$$

Система уравнений связи между масштабами (8.157) состоит из двух уравнений, содержащих пять масштабов. Поэтому три из них, имеющие независимые размерности, могут быть выбраны произвольно. Уравнения связи не содержат масштаба температур  $t_0$ , поэтому он выбран произвольно.

Таким образом, выбирая произвольно следующие четыре масштаба с независимыми размерностями  $t_0, \lambda_0, a_0, l_0$ , полагаем

$$t_0 = t^*, \lambda_0 = \lambda; a_0 = a; l_0 = l_0. \quad (8.159)$$

Равенство  $l_0 = l_0$  следует понимать в том смысле, что в качестве масштаба длин можно выбирать любой геометрический параметр твердого тела.

Масштабы  $\tau_0$  и  $\alpha_0$  определены с помощью уравнений (8.158) и равенства (8.159):

$$\tau_0 = l^2 / a; \alpha = \lambda / l_0. \quad (8.160)$$

Тогда выражения для безразмерных величин будут иметь следующий вид

$$\begin{aligned} X &= x / l_0; & Y &= y / l_0; & Z &= z / l_0; & T_0 &= a\tau / l_0^2; \\ T &= t / t^*; & T_{\text{нач}} &= t_{\text{нач}} / t^*; & A^0 &= al_0 / \lambda; \end{aligned} \quad (8.161)$$

$$\Lambda = 1; \quad A = 1; \quad N = n / l_0.$$

Дифференциальное уравнение (8.150), начальное (8.151) и граничное (8.152) условия теперь могут быть записаны в безразмерном виде:

$$\partial t / \partial T^0 = \nabla^2 T; \quad (8.162)$$

$$T_{\text{нач}} = T^* \text{ при } T^0 = 0; \quad (8.163)$$

$$-(\partial T / \partial N)_{\text{пов}} = A^0(T)_{\text{пов}}, \quad (8.164)$$

причем 
$$A^0 = f_a(X_r, Y_r, Z_r, T^0). \quad (8.165)$$

Интеграл уравнения (8.165), удовлетворяющий начальному и граничному условиям (8.163) и (8.164) должен являться выражением, в котором переменная  $T$  представлена как функция величин (координат, времени и параметров), входящих в дифференциальные уравнения, начальные и граничные условия:

$$T = F(X, Y, Z, T^0, A^0, T_{\text{нач}}), \quad (8.166)$$

причем  $T_{\text{нач}}$  и  $A_0$  определяют из условий (8.163) и (8.165).

Для обеспечения подобия необходимо и достаточно, чтобы в модели все критерии, входящие в интеграл исходного дифференциального уравнения (8.166) (кроме критериев  $X, Y, Z, T^0$ ), были равны соответствующим критериям образца.

Задачу осуществления подобия сводим к реализации следующих требований:

- обеспечения геометрического подобия модели и образца;
- тождественности в модели и образце безразмерных начального и граничного условий

$$T_{\text{нач.м}} = T_{\text{нач.н}} \text{ или } (t / t^*)_{\text{м}} = (t / t^*)_{\text{н}},$$

$$A_{\text{м}}^0 = A_{\text{н}}^0 \text{ или } (al_0 / \lambda)_{\text{м}} = (al_0 / \lambda)_{\text{н}}. \quad (8.167)$$

Если эти требования выполнены, то в сходственные моменты времени

$$T_{\text{м}}^0 = T_{\text{н}}^0 \text{ или } (a\tau / l_0^2)_{\text{м}} = (a\tau / l_0^2)_{\text{н}}$$

и во всех сходственных точках

$$X_{\text{м}} = X_{\text{н}} \text{ или } (x / l_0)_{\text{м}} = (x / l_0)_{\text{н}};$$

$$Y_{\text{м}} = Y_{\text{н}} \text{ или } (y / l_0)_{\text{м}} = (y / l_0)_{\text{н}}; \quad (8.168)$$

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{н}} \text{ или } (z / l_0)_{\text{м}} = (z / l_0)_{\text{н}},$$

будет иметь место равенство

$$T_m = T_n \text{ или } (t/t^*)_m = (t/t^*)_n, \quad (8.169)$$

т.е. будет иметь место подобие температурных полей модели и образца.

Как следует из раздела 8.2 в качестве теплоизолирующего слоя разрабатываемого передвижного контейнера принят полистирол толщиной  $8 \cdot 10^{-2}$  м с параметрами  $\lambda = 3,373 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $a = 0,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, которые обеспечивают минимальные потери теплового потока через стенки контейнера.

Принимая эти параметры для модели, а также сходственные начальные условия изготовлен контейнер с геометрическим масштабом 1:10 вместимостью 100 шт. ОЭ и проведены экспериментальные исследования динамики их температуры согласно методике, изложенной выше. При этом, контейнер в тепловой камере находился на опорах круглого поперечного сечения.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований приведены на рис. 8.36.

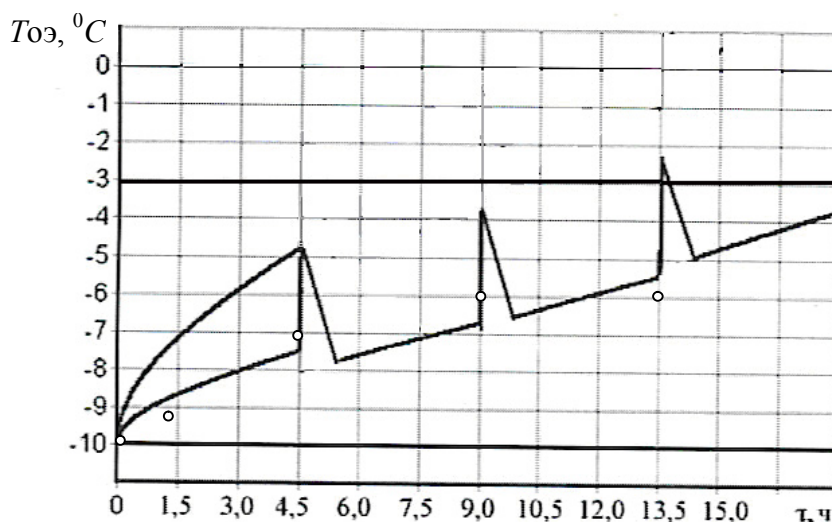


Рис. 8.36. Динамика температуры в верхних углах массива ОЭ, выполненных из поливинилхлоридной пленки в передвижном контейнере  $T_v = 30$  °C,  $u = 0,5$  м/с,  $T_n = -10$  °C;  $\circ$  – данные эксперимента

Максимальная погрешность данных эксперимента и результатов теоретических исследований не превышает 10 %, а время хранения ОЭ при указанных исходных данных равно около 22 ч.

Таким образом, научно обоснованы параметры передвижного теплоизолирующего контейнера (вагонетки-термоса), применение которого позволит оперативно и безопасно вести аварийно-спасательные работы горноспасателями в условиях повышенной температуры шахтного микроклимата.

#### 8.3.4. Исследование динамики температуры водно-солевых растворов, определение их состава и массы

Экспериментальные исследования проведены для установления адекватности с результатами теоретических исследований по выбору состава, массы химических ингредиентов, которые обеспечивают максимальный охлаждающий эффект пакета, и определению удельной теплоемкости водно-солевого раствора.

Исследования проведены в лабораторных условиях НИИГД «Респира-тор».

Оборудование, аппаратура, реактивы и материалы, которые использо-вали, приведены в табл. 8.10.

Таблица 8.10

Средства измерительной техники, вспомогательные устройства,  
реактивы и материалы

Наименование	Соответствие нормативному документу
Датчик температуры с прибором М 838 фирмы ALDA (Китай), абсолютная погрешность 0,5 °С	—
Пирометр «Нимбус» фирмы «Харьков Прибор», абсолютная погрешность 0,5 °С	—
Весы аналитические электронные лабораторные AR-2140	ГОСТ 24104-88
Ексикатор стеклянный ЕВ	ГОСТ 6371-73
Термометр лабораторный ТД-4 № 2	ГОСТ 28498-90
Пипетка с одной отметкой 2-2-5	ГОСТ 29169-91
Колбы мерные 2-25-2; 2-50-2; 2-250-2	ГОСТ 1770-74
Стаканы мерные ВН	ГОСТ 19908-74
Секундомер «Агат»	ТУ 251819-0021-90
Лейка В-25-38 ХС	ГОСТ 25336-82
Цилиндры мерные 2-50-2; 2-100-2	ГОСТ 9545-73
Шкаф сушильный	ТУ 64-Т-909-80Е
Дистиллированная вода	ГОСТ 6609-72
Карбамид	ГОСТ 6691-77
Аммоний азотнокислый	ГОСТ 22867-77
Натрий сернокислый 10-водный	ГОСТ 4171-76
Силикагель, марки ШСМ или КСКГ	ГОСТ 3956-76

Все средства измерительной техники поверенные, реактивы и материалы отвечают показателям качества и срокам хранения, установленными отечественными требованиями.

Измерение понижения температуры раствора во времени проводили с помощью датчика температуры или термометра лабораторного ТД-4 № 2.

При выполнении измерений проводили следующие виды работ:

- подготовка стеклянной посуды;
- подготовка приборов к работе;
- приготовление водно-солевого раствора.

Стеклянную посуду перед использованием обрабатывали хромовой смесью с последующей многократной промывкой водопроводной и дистиллированной водой, сушили при температуре (200-230) °С в сушильном шкафу. После каждого опыта посуду подвергали такой же обработке.

Перед проведением измерений проверяли работоспособность датчика температуры, для чего измеряли температуру окружающего воздуха датчиком и термометром, сравнивая показание. Разница показаний не превышала 0,1 °С.

На аналитических весах брали навески химических ингредиентов и воды, помещали их в емкость 250 см<sup>3</sup> и стеклянной палочкой перемешивали содержимое.

Устройство для определения изменения температуры водно-солевого раствора – эксикатор (рис. 8.37), на дне которого установлен стеклянный стакан, изолированный от действия внешней среды гигроскопическим материалом (эффект термоса).

В отверстие крышки эксикатора вмонтировали электрод датчика температуры. В стакан помещали емкость с водно-солевым раствором. Закрывали эксикатор крышкой с электродом и фиксировали температуру прибором на протяжении 60 мин.

При проведении исследований варьировали составом, массой химических ингредиентов и воды, температурой воды, при использовании водопроводной или дистиллированной воды.

Каждый из опытов повторяли трижды, потом данные усредняли.

Раствор смеси химических ингредиентов в воде рассматривали как трехкомпонентную систему, состав которой изображают с помощью треугольника Гиббса-Розебома.

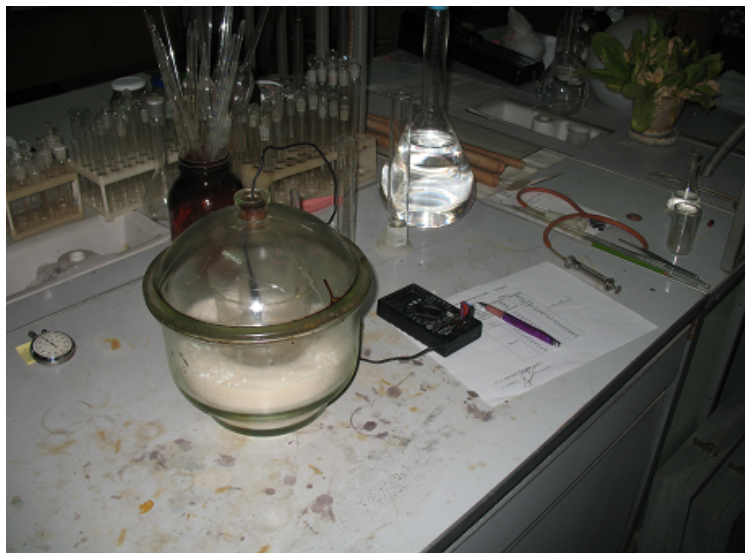


Рис. 8.37. Устройство для определения температуры водно-солевого раствора



Каждый из опытов повторяли трижды, потом данные усредняли.

Раствор смеси химических ингредиентов в воде рассматривали как трехкомпонентную систему, состав которой изображают с помощью треугольника Гиббса-Розебома. Вершины равностороннего треугольника отвечают содержанию в системе 100 % каждого из компонентов (рис. 8.38). На сторонах треугольника располагают состав двухкомпонентных веществ, а точки, которые лежат внутри треугольника, описывают состав трехкомпонентной системы. Для этого необходимо из данной точки провести три прямые черты, параллельные сторонам треугольника, что проходят от данной точки к пересечению с каждой из сторон треугольника.

Отсюда следует, что точка О соответствует составу трехкомпонентной системы  $A:B:C = 40:30:30$  %.

Следует отметить особенность системы вода – карбамид – нитрат аммония. Поскольку эти вещества ограничено растворимы в воде, то рассматривали только часть треугольника Гиббса-Розебома, что отвечает области гомогенного раствора с содержанием воды  $\geq 40$  %.

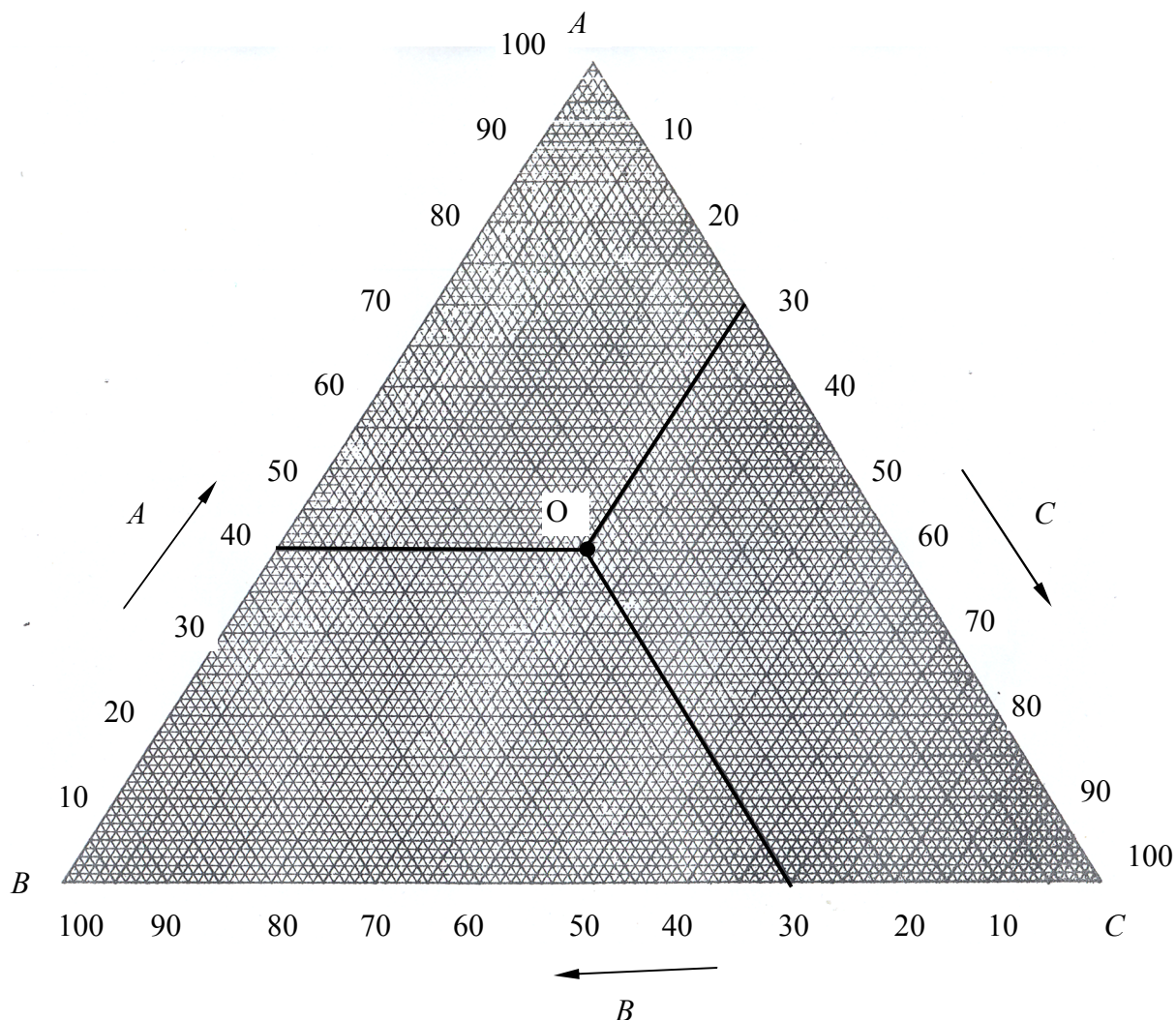


Рис. 8.38. Диаграмма Гиббса – Розебома для определения состава трехкомпонентной смеси

Динамику температуры раствора в охлаждающем пакете определим с помощью прибора М 838, а внешней его поверхности – пирометра «НИМ-БУС» (рис.8.39).



Рис. 8.39. Измерение температуры раствора и температуры поверхности охлаждающего пакета

Исследование по определению температуры водно-солевого раствора через 1 мин после начала растворения в первую очередь провели с различным содержанием карбамида и нитрата аммония. Результаты экспериментов при температурах воды ( $t_{\text{воды}}$ ) и окружающего воздуха ( $t_c$ ) приведены в табл. 8.11.

Аппроксимирующая зависимость температуры раствора ( $t_{\text{pc}}$ ) от содержания воды ( $x$ , %) в данной системе имеет вид:

$$t_{\text{pc}} = a + vx + cx^2. \quad (8.170)$$

Таблица 8.11

Температура водного раствора нитрата аммония и карбамида через 1 мин от начала растворения ( $t_{\text{воды}} = 28^\circ\text{C}$ ,  $t_c = 26^\circ\text{C}$ )

Номер состава	Состав раствора			Температура раствора, $^\circ\text{C}$
	вода	нитрат аммония	карбамид	
1	80	20	0	16
2	60	40	0	8,0
3	40	60	0	2,5
4	80	0	20	18,5
5	60	0	40	12,5



окончание табл. 8.11

6	40	0	60	12,0
7	80	5	15	16,5
8	60	10	30	9,0
9	40	15	45	6,0
10	80	10	10	15,0
11	60	20	20	7,0
12	40	30	30	2,0
13	80	15	5	15,5
14	60	30	10	7,0
15	40	30	30	- 1,5

Значения коэффициентов уравнения (8.170) приведены в табл. 8.12.

Таблица 8.12

Значение коэффициентов уравнения 8.170 для разных сочетаний составов раствора (согласно с табл. 8.11)

Номера состава таблицы 3.2	Значения коэффициентов уравнения (3.1)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1 (1,2,3)	- 26,5	0,687	0,001
2 (7,8,9)	27,5	- 0,622	0,007
3 (10,11,12)	13,5	- 0,412	0,056
4 (13,14,15)	- 17,0	0,400	0
5 (4,5,6)	- 9,5	0,162	0,002

На основе полученных зависимостей определили составы трехкомпонентной системы, при которых наблюдается снижение температуры. Изолинии одинакового снижения температуры раствора приведены на треугольнике Гиббса-Розебома (рис. 8.40), откуда следует, что максимальный охлаждающий эффект имеет состав карбамида, нитрата аммония и воды в соотношении 40:30:30 %.

Изменение температуры раствора  $t_{pc}$  во времени с начала смешивания в трехкомпонентной системе: вода, нитрат аммония, карбамид с начальным равным соотношением компонентов по 50 г приведено на рис. 8.41 (кривая 1). Отсюда следует, что на протяжении 1 мин обеспечивается снижение температуры раствора до минус 7,5 °С, а через 60 мин она достигает плюс 10 °С.

Интерес представляет определение влияния на изменение температуры раствора добавки в данную систему по 100 г воды и карбамида, 15 г пятиводного тиосульфата натрия ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), а затем еще с добавкой 5 г хлорида калия (KCl). Как следует из рис. 8.41 (соответственно кривые 2 и 3), в данном случае также обеспечивается минимальная температура раствора с меньшей скоростью ее повышения, чем в первом случае.

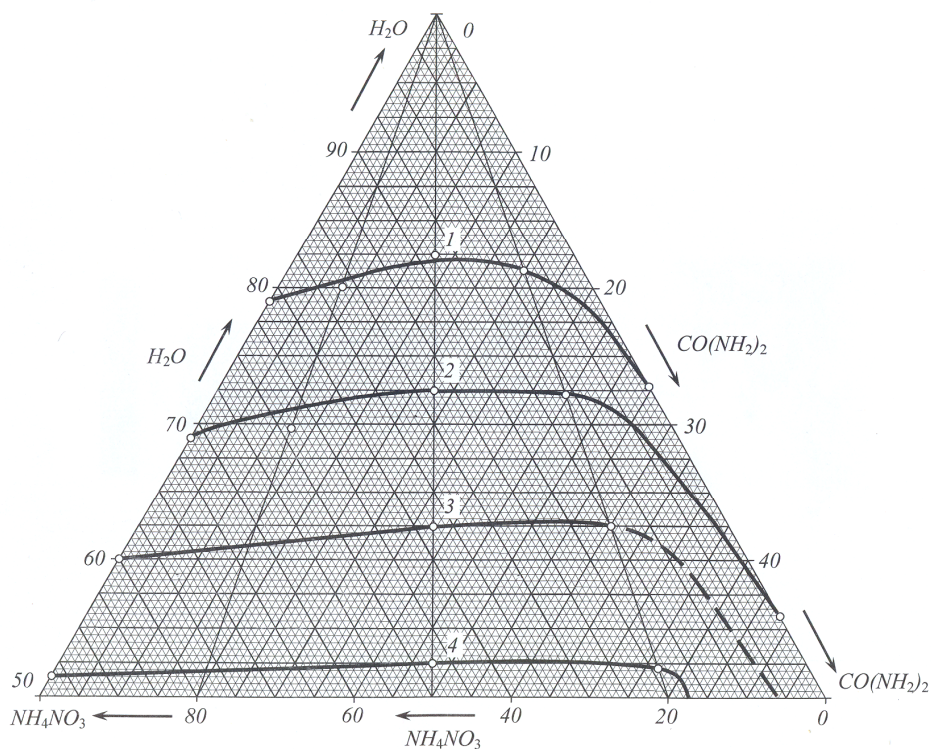


Рис. 8.40. Изолинии снижения температуры водного раствора нитрата аммония и карбамида:

1 –  $t_{pc} = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $t_{pc} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $t_{pc} = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $t_{pc} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Несмотря на позитивный охлаждающий эффект, последние растворы компонентов не могут быть использованы в пакете, так как требуют наличие в нем трех емкостей, изолированных одна от другой.

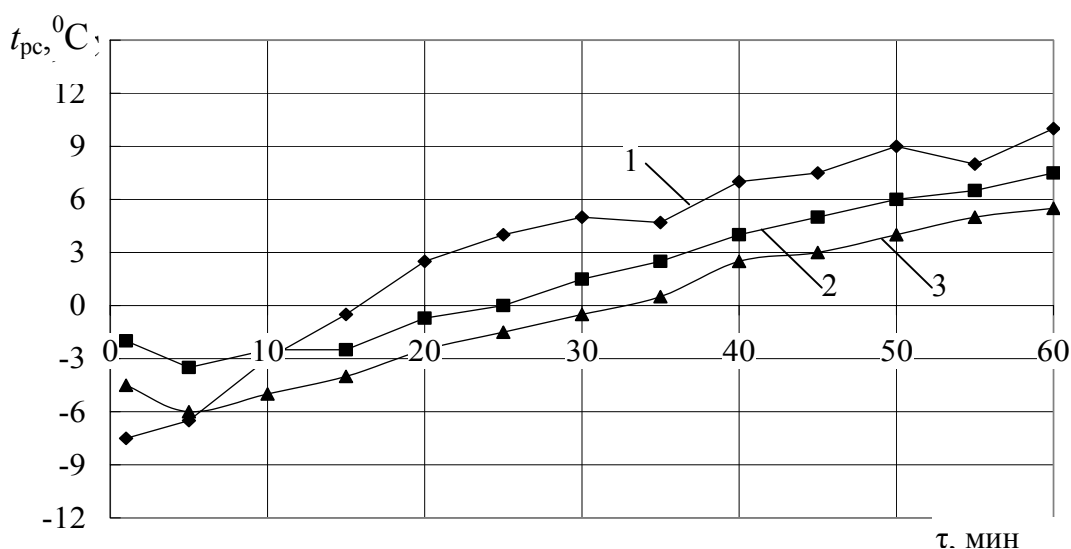


Рис. 8.41. Динамика температуры растворов при температуре окружающего воздуха и воды  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1 –  $\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CO}(\text{NH}_2)_2$  по 50 г; 2 – 100 г  $\text{H}_2\text{O} + 100\text{ г NH}_4\text{NO}_3 + 15\text{ г Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + 100\text{ г CO}(\text{NH}_2)_2$ ; 3 – 100 г  $\text{H}_2\text{O} + 100\text{ г NH}_4\text{NO}_3 + 100\text{ г CO}(\text{NH}_2)_2 + 15\text{ г Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + 5\text{ г KCl}$ .

Динамика температуры раствора из карбамида, нитрата аммония и воды, в зависимости от качества воды: из водопровода или дистиллированной, массы всех компонентов, увеличенной в два и три раза по сравнению с лучшим вариантом табл. 8.11, а также от температуры воды (27 °С и 40 °С) при массе компонентов по 100 г, приведена на рис 8.42 и 8.43.

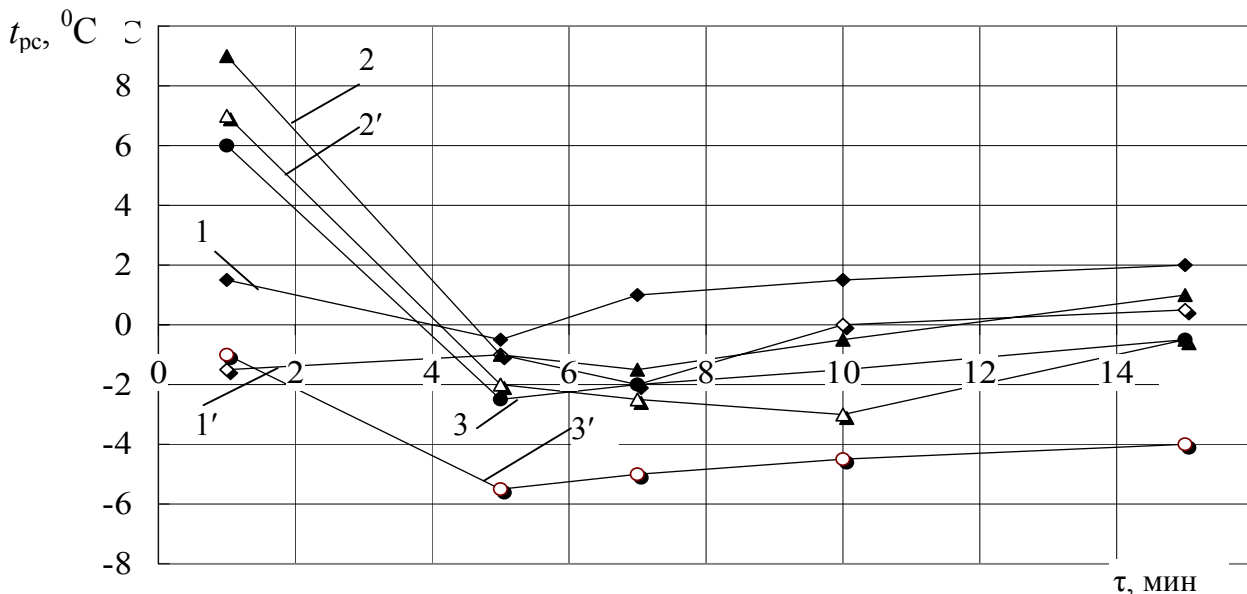
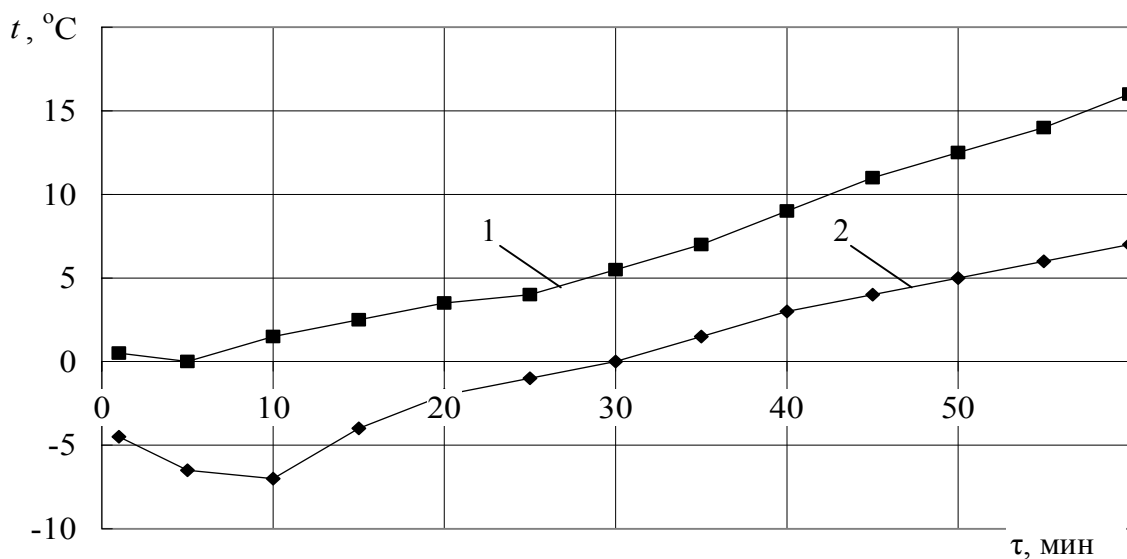


Рис.8.42. Динамика температуры раствора от качества воды и массы химических ингредиентов (1, 2, 3 – вода дистиллированная; 1', 2', 3' – вода водопроводная,  $t_{\text{воды}} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_c = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):

1 – 40 г  $\text{H}_2\text{O}$  + 45 г  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 15 г  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ;

2 – 80 г  $\text{H}_2\text{O}$  + 90 г  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 30 г  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ;

3 – 120 г  $\text{H}_2\text{O}$  + 135 г  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  + 45 г  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ .



8.43. Динамика температуры раствора в пакете с содержанием ингредиентов по 100г  $[\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ , в зависимости от начальной температуры воды; 1 –  $t_{\text{воды}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $t_{\text{воды}} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ этих данных показывает, что лучший охлаждающий эффект имеют растворы с водопроводной водой и общей массой 0,3 кг (см. рис. 8.42). При температуре окружающего воздуха и воды плюс 28 °С температура раствора изменяется от минус 0,5 °С до плюс 7,0 °С на протяжении 60 мин, а при температуре воды плюс 40 °С – от 0 °С до плюс 16,0 °С (см. рис. 8.43).

Для определения динамики температуры раствора по 100 г нитрата аммония, карбамида и воды, а также температуры внешней поверхности пакета изготовлен экспериментальный образец, который состоит из емкостей с водой и химическими ингредиентами, теплоизолирующего слоя и внешней оболочки (см. рис. 8.39). Емкости с водой и химическими ингредиентами изготовили из пропиленовой пленки с помощью термосварки. Первую из них разместили во второй, между второй емкостью и внешней полиэтиленовой оболочкой расположили два теплоизолирующих слоя пенофенола толщиной 2 мм и коэффициентом теплопроводности 0,15 Вт/(м·К), необходимый согласно результатов теоретических исследований, изложенных выше. Измерения температуры раствора и поверхности пакета проводили в течении 60 мин соответственно прибором М 838 и пирометром.

Динамика температуры раствора (кривые 1, 2) и поверхности пакета (кривая 3) при температурах воды плюс 18 °С и плюс 40 °С приведены на рис. 8.44.

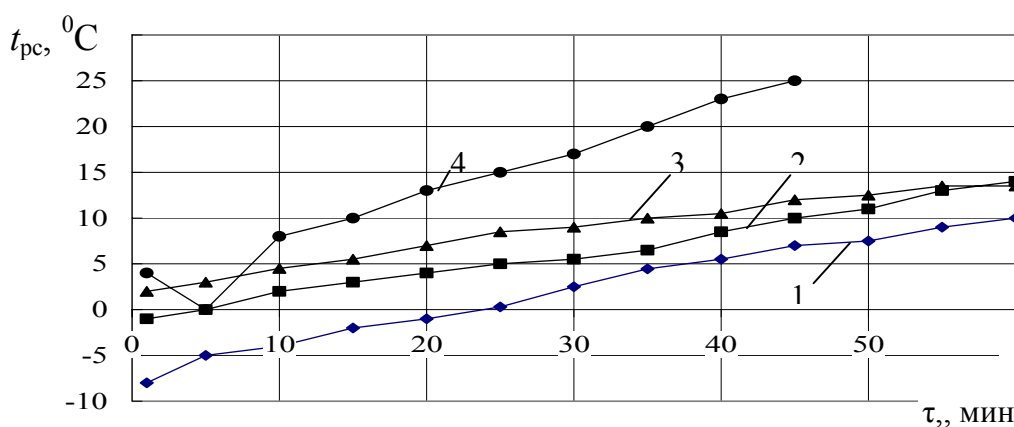


Рис. 8.44. Динамика температуры раствора (1, 2) в пакете и на его поверхности (3) с содержанием по 100 г  $[\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ , в зависимости от начальной температуры воды и температуры окружающего воздуха:

- 1 –  $t_{\text{воды}} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{с}} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $t_{\text{воды}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{с}} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 3 –  $t_{\text{воды}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{с}} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $t_{\text{воды}} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{с}} = (31 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 (при охлаждении испытателя)

Отсюда следует, что температура раствора при вышеупомянутых температурах воды и окружающего воздуха плюс 22 °С на протяжении 5 мин достигает значений минус 8 °С и минус 1 °С, а 60 мин – плюс 10 °С и плюс 14 °С, соответственно. При этом минимальная температура поверхности па-

кета равняется плюс 2,5 °С и в течение 60 мин практически достигает температуры раствора плюс 14 °С.

Максимальная температура раствора в пакете составила плюс 10 °С (рис. 8.45), а на поверхности пакета – 25 °С, что по сравнению с результатами теоретических исследований, составляет максимальную погрешность около 10 %.

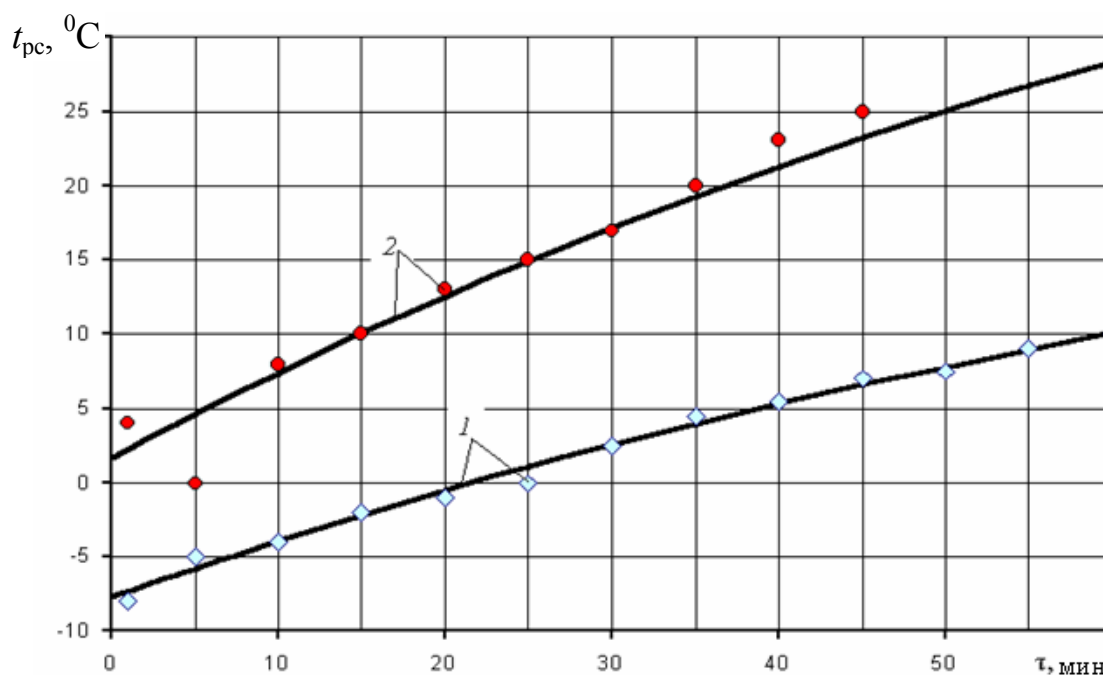


Рис. 8.45. Динамика температуры раствора и поверхности пакета  
 1 – температура раствора; 2 – температура поверхности пакета  
 — — результаты теоретических исследований;  
 ◊ ◉ - данные экспериментов.

Одним из основных параметров пакета является время его охлаждающего действия при оказании помощи пострадавшим в результате перегрева организма и механических повреждений. Исследования по его определению проводили при участии испытателя без доведения до предельных значений физиологических параметров (температуры тела – 38,6 °С и частота сердечных сокращений – 170 мин<sup>-1</sup>) в тепловой камере НИИГД «Респиратор» с температурой воздуха (31±1) °С, влажности (96±2) % и скорости его движения (1±0,1) м/с.

Алгоритм испытаний заключался в следующем. В камере создавался микроклимат, в нее заходил испытатель с охлаждающим пакетом и пирометром, через 60 мин, активируя пакет, прикладывал его к шее. Через пять минут, отводя пакет от шеи, пирометром он проводил измерения температуры пакета, потом прикладывал пакет к другой стороне шеи и через это же время опять проводил измерения температуры и так далее. Исследование прекращали, когда испытатель практически не чувствовал охлаждающего действия пакета.

Результаты исследований (см. рис. 8.44, кривая 4), показывают, что минимальная температура поверхности пакета на протяжении 5 мин равнялась плюс 2 °С, со временем повышалась и через 45 мин достигла значения плюс 25 °С, при которой не обеспечивался охлаждающий эффект.

Следует отметить, что при незначительных перемещениях раствора пакета при его встряхивании, температура поверхности снижалась на (2...3) °С. При этом для поглощения влаги, которая может выделяться из емкости с водой, в емкость с нитратом аммония и карбамидом добавляли 5 г силикагеля, который не влиял на изменение температуры раствора.

Более полные исследования по определению времени охлаждающего действия пакета провели с участием 5-ти горнорабочих и горноспасателей при достижении ими предельных значений физиологических параметров и использовании опытных образцов, результаты которых приведены ниже.

Температуру поверхности пакета рассчитывали с учетом предполагаемой линейной зависимости от температуры раствора. При этом величину  $T_{\min}$  заменяли на текущую температуру раствора и использовали значение  $Bi_{\delta} = 0,0395$ . Получили (с учетом измерения температуры поверхности пакета на 5-ой минуте) зависимость температуры поверхности пакета  $T_{\pi}$  (°С) от температуры окружающей среды  $T_c$  и температуры раствора  $T_p$  вида:

$$T_{\pi\pi} = Bi_{\delta} \cdot (T_c + 358) + T_p. \quad (8.171)$$

При этом максимальное отклонение расчетных величин от экспериментальных не превышает 8 %.

Таким образом, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что теплоизолирующая прослойка пакета должна иметь коэффициент теплопроводности порядка  $\lambda_T = (0,1...0,2)$  Вт/(м · К) при толщине  $\delta = (2...4)$  мм.

Удельную теплоемкость данного охлаждающего раствора определяли следующим образом. В теплоизолирующую оболочку помещали охлаждающий пакет с определенной массой ингредиентов, смешивали их на протяжении одной минуты. Температура раствора снижалась к минимальному значению, в раствор помещали второй полиэтиленовый пакет с водой, которая имела также определенную температуру и одинаковую с ингредиентами массу. При проведении пяти опытов, по окончании некоторого времени конечная температура раствора в пакетах выравнивалась. Количество тепла  $Q_1$ , кДж, поглощенное охлаждающей смесью, равняется количеству тепла  $Q_2$ , кДж, отданного водой охлаждающему раствору, то есть

$$Q_1 = mC_p(T_1 - T_2), Q_2 = mC_B(T_2 - T_3), \quad (8.172)$$

где  $m$  – массы ингредиентов и воды, которые равны, кг;  
 $C_p, C_B$  – удельная теплоемкость раствора и воды, кДж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;

$T_1, T_2, T_3$  – начальная и конечная температуры раствора и начальная температура воды соответственно, К.

Из уравнения (8,172) следует:

$$C_p = C_b \frac{(T_2 - T_3)}{(T_1 - T_2)} \quad (8.173)$$

При исследованиях варьировали массу раствора с одинаковой пропорцией химических ингредиентов и воды, а измерения температуры проводили с помощью прибора М 838.

Установлено, что среднее значение удельной теплоемкости охлаждающего раствора равно  $2,95 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$  (табл. 8.13), которое использовано в подразделе 8.2.3.

Таблица 8.13

Результаты экспериментальных исследований для определения удельной теплоемкости раствора нитрата аммония, карбамида и воды

Наименование показателей	Значение показателей				
Масса охлаждающего раствора, кг	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36
Масса воды, кг	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36
Начальная температура раствора, $T_1$ , К	266	265	265	264	264
Конечная температура раствора, $T_2$ , К	285	285	282	282	282
Начальная температура воды, $T_3$ , К	298	299	294	295	295
Удельная теплоемкость раствора, $C_p$ , $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$	2,85	2,93	2,97	3,01	3,01

Отсюда следует, что с увеличением массы раствора до 0,3 к его удельная теплоемкость увеличивается и в дальнейшем не изменяет своего значения.

Зная удельную теплоемкость, которая для раствора равняется  $3,01 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , а также общую его массу и градиент температуры между раствором и окружающим воздухом, можно определить количество теплоты, поглощаемым раствором.

8.3.5. Исследования по определению параметров охлаждающего пакета и определение времени восстановления теплового состояния пострадавших при перегревании

Одним из основных параметров пакета является время его охлаждающего действия в период оказания доврачебной помощи пострадавшим горно-рабочим в результате перегревания организма и при механических травмах (снятие болевого синдрома). Исследования по его определению проводили с

участием испытателя без доведения его организма до предельных значений физиологических параметров (температуры тела –  $38,6^{\circ}\text{C}$  и частоты сердечных сокращений (ЧСС) –  $170 \text{ мин}^{-1}$ ) в тепловой камере НИИГД «Респира-тор» с температурой воздуха плюс  $(31 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ , влажностью  $(96 \pm 2)\%$  и скоростью движения  $(1 \pm 0,1) \text{ м/с}$ .

Время охлаждающего действия пакетов во время перегревания испы-тателей определяли доведением их организма до предельных значений физио-логических параметров и экстренным охлаждением наиболее чувстви-тельных частей тела.

Исследования проводили при участии пяти испытателей: респиратор-щиков горноспасательного отряда и членов ВГК шахты, которые имеют опыт работы в условиях повышенной температуры, прошли медицинский осмотр, получили разрешение на проведение испытанием и изучили руководство по эксплуатации пакетов ПХО.

Методика проведения данных исследований аналогична методики ис-следований в костюме КЭОП, за исключением следующего.

С каждым испытателем проводили одно исследование. В конце каждо-го периода работы и отдыха у испытателей измеряли и регистрировали ЧСС, ректальную и кожную температуры.

При достижении испытателями предельного теплового состояния уста-новленными санитарными нормами: значениями ЧСС =  $170 \text{ мин}^{-1}$ , ректаль-ной температуры  $t_p = 38,6^{\circ}\text{C}$ , или при самочувствии испытателей, оценивае-мом ими как нетерпимое, работу прекращали и они занимали положение си-дя на кушетке, не выходя из тепловой камеры.

Испытатели и медицинский работник вынимали из транспортной сум-ки от семи до десяти пакетов, клали их на коврик, расположенный непосред-ственно возле испытателей, снимали у них обувь. После этого они брали в руки по одному пакету, измеряли пирометром их начальную температуру, с помощью сжатия руки проводили по очереди разгерметизацию емкостей с водой, встряхивая пакеты от семи до десяти раз, затем медицинский работ-ник измерял температуру поверхности охлаждающих пакетов.

Испытатели прикладывали два пакета к стопам ног с помощью фикси-рующего приспособления, два пакета – в области межгрудинной поверхности и сердца, а после этого одевали два пакета на кисти рук и прикладывали их к шее в области сонной артерии.

Сначала, через каждые  $(2...3)$  мин, отводя один, а затем другой пакеты от шеи, медицинский работник измерял температуру их поверхности, после этого - через каждые 5 мин. Параллельно измеряли ЧСС, ректальную и кож-ную температуры, проводили опрос о теплоощущении. Период восстано-вления считали при достижении  $t_p$  и ЧСС допустимых их значений, после чего испытатели выходили из тепловой камеры, у них измеряли артериальное дав-ление, силу кисти и выдержку к статическому усилию, взвешивали на весах,



проводили опрос о самочувствии и оценку эффективности использования пакетов.

В процессе эрготермической нагрузки проводили контроль физиологического состояния испытуемых по двум основным показателям: ЧСС и температуре тела (ректальной температуры), динамика которых приведена на рис.8.46, где линиями отображены аппроксимирующие зависимости. Следует отметить, что на них приведены данные показателей, которые зафиксированы сразу по окончании работы, то есть – перед отдыхом.

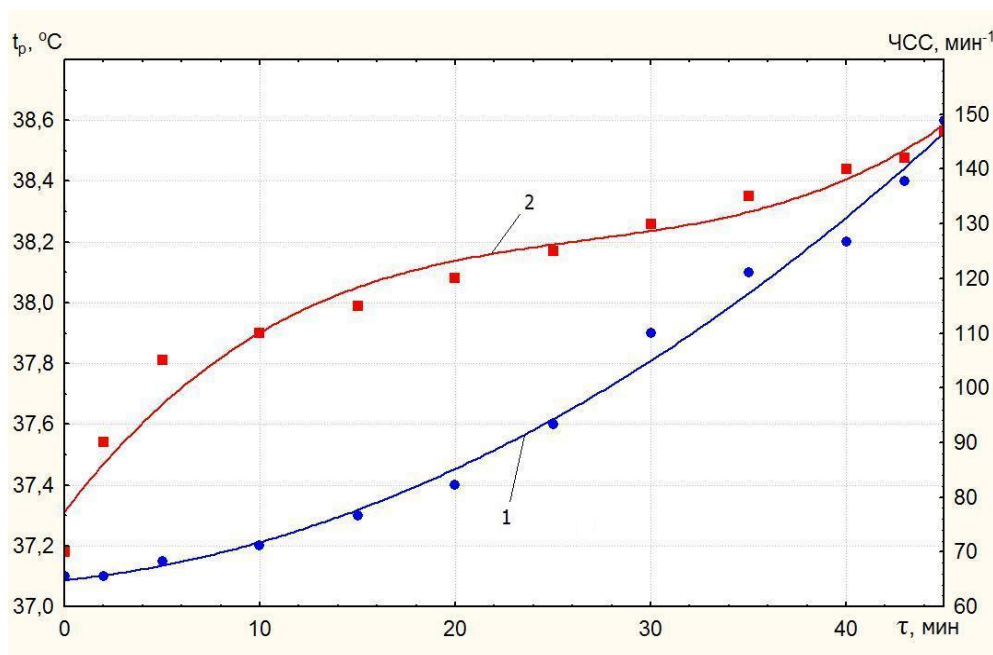


Рис. 8.46. Динамика изменения  $t_p$  (1) и ЧСС (2) испытуемых в процессе эрготермической нагрузки в тепловой камере:

•, ■ - данные экспериментов

Анализ результатов показывает, что зависимость этих показателей является нелинейной, при начальных средних значениях ЧСС=70 мин<sup>-1</sup> и  $t_p$ =37,1 °C за 45 мин, первый показатель испытуемых превышал допустимое значение (147 мин<sup>-1</sup>), а второй – достигал предельное значение (38,6 °C). Более динамичным показателем является ЧСС, который в период работы испытуемых, особенно во время переноса кирпичей, достигал максимального значения 160 мин<sup>-1</sup>, но в среднем его значение в конце работы не достигало предельного состояния.

Перед началом охлаждения пакетами проводили опрос о теплоощущениях испытуемых, их оценка равнялась 20 баллов (очень жарко) по 21-бальной системе. Больше всего перегревались голова, лицо, грудь, ладони и стопы ног. Они отмечали слабость, головокружение, невнимательность, беспокойность, тяжесть в ногах, поэтому дальнейшее пребывание испытуемых в тепловой камере без охлаждения было невозможным.

Для охлаждения наиболее чувствительных к теплосъему частей тела испытатели самостоятельно проводили активацию шести пакетов, ложились на кушетку и прикладывали два пакета в вышеуказанные места.

Динамика ЧСС и ректальной температуры в процессе охлаждения испытателей пакетами приведена на рис.8.47, анализ результатов показывают, что зависимость показателей также является нелинейной: через три минуты ректальная температура практически не изменяется и принимает допустимое значение ( $38,0^{\circ}\text{C}$ ) в среднем через 21 мин, на 27 мин –  $37,6^{\circ}\text{C}$ , а ЧСС через одну мин – ( $140\text{ мин}^{-1}$ ), а на 27 мин –  $80\text{ мин}^{-1}$ .

Субъективная оценка опроса испытателей следующая: в первые минуты охлаждения пакетами они отмечали ощущение приятной легкой прохлады участков тела, исчезали головокружение, слабость, значительно улучшилось самочувствие, нормализовался ритм работы сердца в среднем на 21 мин, а на 27 мин их состояние стало комфортным и они были готовы выполнять физическую работу.

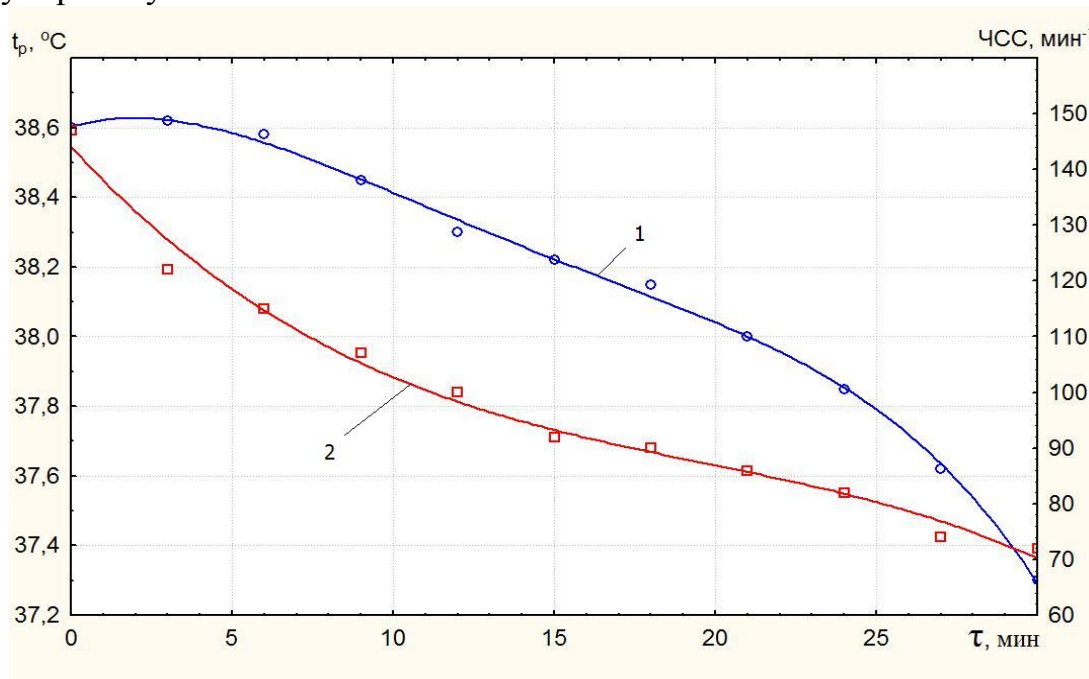


Рис. 8.47. Динамика изменения  $t_p$  (1) и ЧСС (2) испытателей в процессе экстренного охлаждения пакетами:  $\square$ ,  $\circ$  - данные экспериментов

Сравнивая результаты исследований процесса охлаждения пакетами с помощью быстроразъемного костюма КЭОП с водолеяными охлаждающими элементами, которые находятся на оснащении подразделений ГВГСС, необходимо отметить следующее. В первом случае ректальная температура снижается медленнее, но достигает своего допустимого значения ( $38,0^{\circ}\text{C}$ ) на 22-ой мин, во втором – на 30-ой мин, ЧСС – быстрее и достигает начальное значение практически на 30-ой мин.

Следует отметить, что во втором случае ЧСС испытателей не достигала предельного значения в процессе эрготермической нагрузки и равнялась около  $110\text{ мин}^{-1}$ .

Динамика ректальной температуры  $t_p^H$ , °С и ЧСС<sup>H</sup>, мин<sup>-1</sup> испытуемых в процессе эрготермической нагрузки описывается аппроксимирующими уравнениями:

$$t_p^H = 0,576 \cdot 10^{-3} \tau^2 + 0,6831 \cdot 10^{-2} \tau + 37,0865; \quad (R = 0,9823),$$

$$\text{ЧСС}^H = 0,1984 \cdot 10^{-2} \tau^3 - 0,15647 \tau^2 + 4,63465 \tau + 77,4371; \quad (R = 0,9871),$$

а в процессе экстренного охлаждения, соответственно (с индексом «0»)

$$t_p^0 = -0,85 \cdot 10^{-5} \tau^4 + 0,478 \cdot 10^{-3} \tau^3 - 0,878 \cdot 10^{-2} \tau^2 + 0,028948 \tau + 38,6;$$

$$(R = 0,9972);$$

$$\text{ЧСС}^0 = -0,434 \cdot 10^{-2} \tau^3 + 2,7713 \tau^2 - 6,7527 \tau + 145,797; \quad (R = 0,9988).$$

Несмотря на то, что охлаждения испытуемых пакетами проводили в условиях повышенной температуры тепловой камеры, а в костюме КЭОП – при изоляции от внешней среды, время достижения допустимого значения ректальной температуры в первом случае в 1,4 раза меньше, чем во втором. Этот эффект достигается с помощью непосредственного охлаждения пакетами частей тела испытуемых за счет теплопроводности по сравнению с их охлаждением – конвективно-лучистом теплообменом в костюме КЭОП.

В связи с тем, что пакеты с водно-солевым раствором в отличие от водоледяных ОЭ, не являются жесткими, их можно эффективно использовать для снижения болевого синдрома при механических травмах пострадавших.

Следовательно, использование пакетов позволяет оказывать доврачебную помощь пострадавшим при перегревании организма и механических травмах непосредственно в условиях повышенной температуры, сохранить их здоровье и жизнь, снизить расходы на лечение и выплату по профессиональному заболеванию.

Таким образом, на основании проведенных исследований научно обоснованы параметры средств индивидуальной противогазотепловой защиты членов аварийно-спасательных подразделений и горнорабочих (членов ВГК шахты), конструкции исполнения и технические характеристики которых приведены в следующем разделе.

## 9. СОЗДАНИЕ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ

### 9.1 Конструктивные решения и технические характеристики противогазотепловой одежды

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в предыдущих разделах, разработаны конструкции и определены технические характеристики средств индивидуальной противогазотепловой защиты горноспасателей, горнорабочих (членов ВГК шахты) и членов пожарных подразделений [42].

Газотеплозащитный костюм (ГТЗК) предназначен для защиты горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ в газообразной среде при наличии в ней в любом сочетании следующих вредных веществ: хлорбензола, ацетона, толуола, фенола, формальдегида, метанола, стирола, углеводородов. Максимальная концентрация этих веществ может соответствовать насыщенному состоянию их паров при температуре около 20 °С.

В состав костюма входят наружная изолирующая оболочка (комбинезон), охлаждающая внутренняя оболочка, изолирующий регенеративный респиратор и баллон со сжатым воздухом емкостью 2 л для создания воздушного пространства в двухслойном комбинезоне.

Для обеспечения безопасной работы членов ВГК в зоне воздействия вредных химических веществ в течение заданного времени наружный слой комбинезона выполнен из прорезиненной ткани ПМБК-ПК толщиной 5 мм, внутренний – ПМБК-О толщиной 3 мм с воздушной прослойкой – 10 мм, избыток воздуха из которой регулируется клапанами, расположенными на наружной поверхности комбинезона.

Наружный и внутренний слои теплоизолирующей оболочки выполнены из комбинированной ткани, между которыми расположено объемное полотно (синтепон) в два слоя, а на внутренней поверхности оболочки размещены ОЭ-2.

Техническая характеристика газотеплозащитного костюма приведена в табл. 9.1.

Сравнительные параметры табл. 9.1, полученные в результате использования однослойной наружной оболочки комбинезона и существующего метода расчета времени защитного действия костюма от приведенных выше химических веществ и температуры 40 °С, изложенные в подразделе 3.3, по сравнению с разработанным методом показывают следующее. В первом случае общий заряд льда в системе охлаждения больше на 35 %, количество ОЭ-2 – на 10 шт, масса костюма – на 6 кг, а срок службы меньше примерно в 1,7 раза.

## Техническая характеристика газотеплозащитного костюма ГТЗК

Наименование показателя	Значение, полученное	
	по существующему методу	по разработанному методу
Время защитного действия костюма при температуре окружающего воздуха 40 °С, его относительной влажности до 100 % (и воздействии химических веществ), мин, не менее	120 (180)	120 (180)
Применяемые респираторы, тип	Р-30, Р-34	РС
Общий заряд льда в системе охлаждения, кг	6,5	4,8
Количество охлаждающих элементов ОЭ-3 шт	38	28
Масса снаряженного костюма в комплекте с респиратором, кг, не более	27	21
Срок службы, лет, не менее	3	5

Противотепловой костюм (ПТГ) предназначен для защиты горноспасателей (членов ВГК шахты) от воздействия высокой (до 100 °С) температуры окружающей среды и теплового излучения открытого пламени мощностью до 5 кВт/м<sup>2</sup> при тушении пожаров в начальной стадии их развития. Он состоит из наружной теплоизолирующей, огнестойкой оболочки, выполненной из стеклоткани, пропитанной термостойким клеем с алюминизированной термостойкой полиамидной пленкой, создающей зеркальную поверхность, отражающую до 70 % тепловую радиацию. Оболочка выполнена в виде комбинезона с капюшоном, который снабжен иллюминатором с термостойким стеклом. Под наружной оболочкой находится теплоизолирующая оболочка, состоящая из куртки, капюшона и бурс, наружная и внутренняя часть которых изготовлена из комбинированной ткани, а объемное теплоизолирующее полотно – из огнестойкого фенилона. Под теплоизолирующей оболочкой размещены полиэтиленовые решетчатые карманы для ОЭ-2. Бахилы и рукавицы изготовлены из материала, аналогичного, как и для комбинезона. Ступни ног охлаждаются с помощью ОЭ-2, расположенных на войлочной подкладке сапог под бахилами, а кисти рук – половины ОЭ-2 на наружной их поверхности в рукавицах, секции которых расположены на 90° по отношению к фалангам пальцев рук для обеспечения гибкости при использовании средств пожаротушения.

Техническая характеристика костюма ПТГ приведена в табл. 9.2.

Защита органов дыхания осуществляется с помощью регенеративного респиратора РС, который по сравнению с другими респираторами обладает минимальной массой и расположен под одеждой на спине.

Респиратор специальный РС предназначен для индивидуальной защиты органов дыхания человека при работе в среде, содержащей токсичные вещества или бедной кислородом при ведении аварийно-спасательных и технических работ в угольных шахтах, на металлургических и химических предприятиях.

Таблица 9.2

Техническая характеристика противотеплового костюма ПТГ  
для горноспасателей и членов ВГК

Наименование показателя	Значение
Время защитного действия (допустимая продолжительность работы) при воздействии теплового лучистого потока 5 кВт/м <sup>2</sup> или 100 °С и энергозатратах 320 Вт, мин, не менее	60
Время подготовки и снаряжения, мин, не более	5
Масса льда в системе охлаждения, кг, не более	6,2
Количество охлаждающих элементов ОЭ-2, шт	36
Степень черноты наружной поверхности оболочки	0,3
Полная масса снаряжения с респиратором РС, кг, не более	20
Срок службы, лет, не менее	5

В аппарате используются два регенеративных патрона серийно выпускаемого самоспасателя ШСС-1. Важным преимуществом респиратора на химически связанном кислороде РС является то, что время его защитного действия лимитируется превышением допустимой концентрации углекислого газа, то есть, в отличие от аппарата на сжатом кислороде он еще в течение некоторого времени обеспечивает человека смесью, пригодной для дыхания. Сравнительно более низкая температура и влажность вдыхаемого воздуха, отсутствие в нем продуктов метаболизма, которые «дожигаются» в регенеративном патроне, обеспечивают комфортность дыхания при любой температуре и физической нагрузке. Важнейшее преимущество этого аппарата – низкие эксплуатационные расходы по сравнению с респираторами на сжатом кислороде. Техническая характеристика респиратора РС приведена в табл. 9.3.

Конструкция костюмов ГТЗК и ПТГ, состоящая из многих составных частей, обеспечивает быструю подгонку их на человека с различным ростом и комплекцией, герметичность, стирку и сушку, ремонт и хранение в режиме ожидания применения. Костюмы могут быть подвешены на плечиках или находиться в транспортных сумках.

Общий вид костюмов ГТЗК (слева) и ПТГ (справа) приведен на рис. 9.1.

Техническая характеристика респиратора  
на химически связанном кислороде РС

Наименование показателя	Значение
Время защитного действия при окружающей среды 40 °С, мин, не менее:	
работа средней тяжести	120
относительный покой	480
Вместимость дыхательного мешка, л, не менее	6,0
Масса в снаряженном состоянии (без лицевой части), кг, не более	7,5
Габаритные размеры, мм, не более	440×340×140
Срок службы, лет, не менее	10
Назначенный срок хранения регенеративного патрона, лет	2



Рис. 9.1. Общий вид газотеплозащитного ГТЗК (слева) и противотеплового ПТГ (справа) костюмов горноспасателя и члена ВГК шахты

Противотепловая куртка ТК- 50 (рис. 9.2) с технической характеристикой (табл. 9.4) предназначена для повышения эффективности ведения аварийно-спасательных работ горноспасателями в условиях температуры от 27 до 60 °С и относительной влажности воздуха до 100 %.



Рис. 9.2. Противотепловая куртка ТК-50

Таблица 9.4

Техническая характеристика противотепловой куртки ТК-50

Наименование показателя	Значение
Система охлаждения	Радиационно-конвективная с использованием водоледяных элементов ОЭ-3
Время защитного действия при температуре окружающей среды, °С, мин	
27	240
40	40
50	30
60	10



Противотепловой костюм ТК-60М (рис. 9.3) с технической характеристикой (табл. 9.5) предназначен для защиты горноспасателей от воздействия повышенной температуры окружающей среды в пределах 30-60 °С при ведении горноспасательных работ в шахте в непригодной для дыхания атмосфере с высокой влажностью.



Рис.9.3. Противотепловой костюм горноспасателя ТК-60М

Таблица 9.5

Техническая характеристика противотеплового костюма ТК-60М

Наименование показателя	Значение
Время защитного действия при указанной температуре окружающей среды, °С , мин, не менее	
30-40	120
50	110
60	90
Масса охлаждающих элементов ОЭ-3, кг	6,7
Масса снаряженного костюма с респиратором и светильником, кг, не более	25
Назначенный срок службы при применении не более 35 раз, лет	5

Костюм ТК-60М автономен и имеет систему охлаждения с использованием водоледяных охлаждающих элементов, которые хранятся и транспортируются в специальных теплоизолированных контейнерах в замороженном состоянии. В костюме защита дыхания обеспечивается изолирующим регенеративным респиратором Р-34 со сжатым кислородом, при этом он может

быть использован членом ВГК шахты при проведении аварийно-спасательных работ в указанном диапазоне температур воздуха окружающей среды.

Костюм ПТК-80 (рис. 9.4) с технической характеристикой (табл. 9.6) предназначен для защиты горноспасателей от воздействия высокой температуры окружающей среды в пределах 40-150 °С при ведении горноспасательных работ в шахте в непригодной для дыхания атмосфере с влагосодержанием до 150 г влаги на 1 кг воздуха.



Рис. 9.4. Противотепловой костюм горноспасателя ПТК-80

Таблица 9.6

Техническая характеристика противотеплового костюма ПТК-80

Наименование показателя	Значение
Время защитного действия при указанной температуре окружающей среды, °С, мин, не менее	
60	100
80	90
100	75
110	70
150	45
Масса снаряженного костюма с респиратором, светильником и аппаратом ВЧ связи, кг, не более	29
Назначенный срок службы при применении не более 35 раз, лет	5

Костюм ПТК-80 автономен и имеет систему охлаждения с использованием водолеяных охлаждающих элементов, которые хранятся и транспортируются в специальных теплоизолированных контейнерах в замороженном состоянии, а защита дыхания горноспасателя обеспечивается изолирующим регенеративным респиратором Р-34 со сжатым кислородом.

Противотепловой костюм ПТК-300 (табл. 9.7) предназначен для защиты личного состава аварийно-спасательных команд от воздействия высокой температуры окружающей среды, теплового излучения и, кратковременно, от воздействия открытого пламени при тушении пожаров.

Таблица 9.7

#### Техническая характеристика противотеплового костюма ПТК-300

Наименование показателя	Значение
Время защитного действия костюма при воздействии конвективного тепла при температуре 300 °С или теплового излучения с плотностью потока до 13 кВт/м <sup>2</sup> , мин, не менее	20
Устойчивость наружной оболочки к воздействию открытого пламени, с, не менее	10
Масса костюма, снаряженного охлаждающими элементами ОЭ-3 (без респиратора), кг, не более	20
Средний срок службы, лет, не менее	5

Костюм ПТК-300 автономен и имеет систему охлаждения с использованием водолеяных охлаждающих элементов, которые хранятся и транспортируются в специальных теплоизолированных контейнерах в замороженном состоянии. В костюме применяется изолирующий респиратор со сжатым кислородом.

Следовательно, согласно подразделу 3.2 (см. рис. 3.3), разработан типоряд противотепловой защиты горноспасателей (членов ВГК шахты), обозначенный буквами А-Г, а также газотеплозащитный костюм (ГТЗК) в диапазоне температур шахтной воздушной среды (27... 300) °С (рис. 9.5), который внедрен в подразделения ГВГСС.

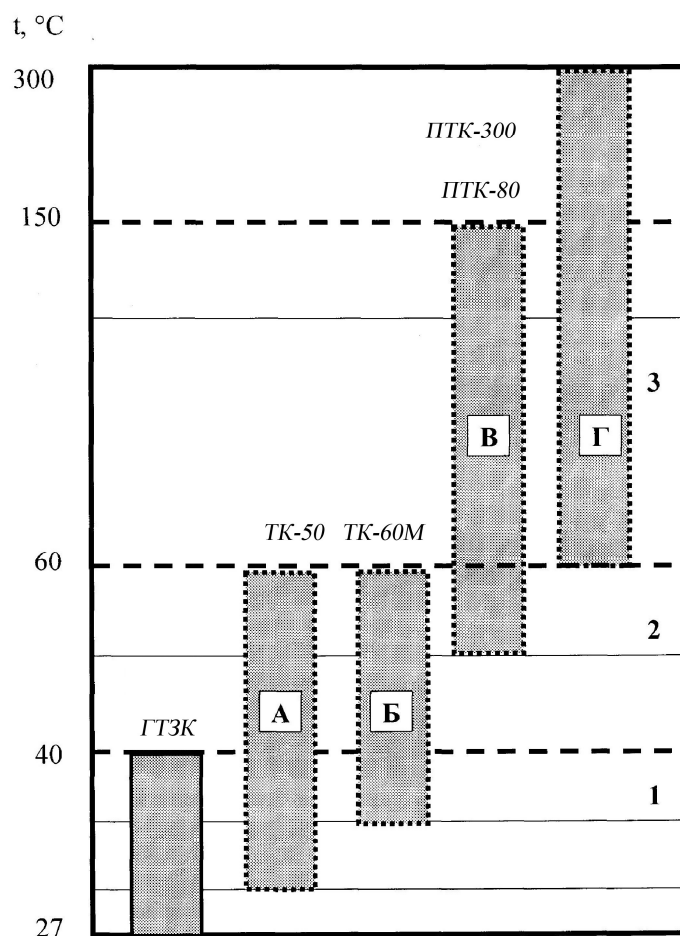


Рис. 9.5. Типоряд противогазотепловой защиты горноспасателей (членов ВГК шахты): А-Г–противотепловая одежда; ГТЗК– газо-теплозащитный костюм с временем защитного действия 120 мин

Охлаждающий жилет (ОЖГ) (рис. 9.6) с технической характеристикой (табл. 9.8) предназначен для защиты горнорабочих при выполнении работ в горных выработках шахт с температурой окружающей среды от 27 до 40 °С, влажностью до 100 % и скоростью движения воздуха до 6 м/с.

Таблица 9.8

Техническая характеристика охлаждающего жилета ОЖГ

Наименование показателя	Значение
Время защитного действия без переснаряжения ОЭ-3, мин, при влажности воздуха до 100 %, скорости движения 1 м/с, энергозатратах человека 350 Вт и температуре окружающей среды от 27 до 40 °С, не менее	120-40
Масса льда в системе охлаждения, кг, не более	2,3
Количество охлаждающих элементов ОЭ-3, шт, не более	13
Масса снаряженного жилета, кг, не более	3,2

Срок службы, лет, не менее	3
----------------------------	---

*а**б*

Рис. 9.6. Охлаждающий жилет горнорабочего ОЖГ:

*а* – общий вид; *б* – в развернутом виде

На основании вышеприведенных результатов теоретических исследований и испытаний при тяжелой нагрузке пожарных получены технические характеристики противотепловых охлаждающих костюмов (табл. 9.8), откуда следует, что незначительное увеличение массы костюма ПТОК-2 (на 0,8 кг) увеличивает длительность работы в нем приблизительно в 1,4 раза по сравнению с костюмом ПТОК-1.

Таблица 9.8

Технические характеристики противотепловых охлаждающих костюмов ПТОК-1, ПТОК-2 для пожарных

Показатель	Значение	
	ПТОК-1	ПТОК-2
Масса одежды, кг, не более,	16,5	16,8
в том числе масса системы охлаждения	7,0	7,5
Полная масса снаряжения с респиратором, кг, не более	24,0	24,8
Запас холода, кДж, не менее	2800	3990
Степень черноты внешней поверхности одежды	0,1	0,1
Срок службы (при применении не более 40 раз), лет, не менее	5	5
Время защитного действия (допустимая длительность работы), мин, не менее, при температуре окружающего воздуха, °С		
100	54	75
150	43	60
200	40	55
250	35	50
300	32	45
350	30	42
400	28	40
450	25	36

500	22	32
-----	----	----

Общий вид костюмов аналогичен костюму ПТГ (см. рис. 9.1).

Сравнительные результаты с костюмом аналогичного назначения (тушение пожаров) ПТК-300 для горноспасателей показывают, что разработанные костюмы для пожарных приблизительно в 1,6 раза меньше по массе в снаряженном виде и с временем защитного действия или допустимой длительности работы соответственно в 1,6 и 2,2 раза больше при температуре окружающей среды 300 °С.

Костюмы типа ПТОК предназначены для защиты пожарных от влияния высокой температуры окружающей среды, теплового излучения и временно от влияния открытого пламени при тушении пожаров. Они состоят из внешней теплоизолирующей, огнестойкой оболочки, выполненной из стеклоткани, пропитанной термостойким клеем из алюминизированной термостойкой пленкой полиамида, которая создает теплоотражающую поверхность, которая отражает до 90 % тепловой радиации. Оболочка выполнена в виде комбинезона с капюшоном, который имеет иллюминатор с термостойким стеклом. Под внешней оболочкой находится теплоизолирующая внутренняя оболочка, которая состоит из куртки, капюшона и бурок, внешняя часть которых изготовлена из термостойкой негорючей ткани (оксалон, фенилон или тогилон), а объемное теплоизолирующая холстина – из огнестойкого фенилона, сетка – из пенополиуретана и подкладка из комбинированной ткани. Под теплоизолирующей оболочкой размещены полиэтиленовые решетчатые карманы для охлаждающих элементов ОЭ-3. Бахилы и рукавицы изготовлены из материала, аналогичного, как и для комбинезона. В охлаждающих карманах и стельках ног находится около одного килограмма льда. Ступни ног и кисти рук в ПТОК-1 охлаждаются так же, как и в костюме ПТК-80 для горноспасателей. В герметичных ампулах ОЭ-3 рукавиц ПТОК-2 находится около 0,5 кг льда.

Время снаряжения костюмов с помощью одного человека составляет около 5 мин.

Следует отметить, что использование в противогазотепловой одежде ОЭ-3, так как и в жилете (см. подраздел 8.33), обеспечит увеличение времени их защиты до 25%.

Для защиты органов дыхания в костюмах применяется регенеративный респиратор РС, используемый в подразделениях пожарной охраны, и расположен под одеждой на спине.

Охлаждающие элементы ОЭ-3, как отмечено выше, серийно выпускаются и для их замораживания, также как и для горноспасателей, можно использовать морозильные камеры, шкафы, прилавки со средней температурой среды минус (13...15) °С, которые должны быть расположены в подразделениях пожарной охраны.

Для сохранения и доставки замороженных охлаждающих элементов ОЭ-3 к месту ведения аварийно-спасательных работ можно использовать теплоизолирующие контейнеры К-2, применяемые горноспасателями.

При длительном ведении аварийно-спасательных работ в условиях высоких температур, особенно при ликвидации пожаров, количества ОЭ-3, что находятся в стационарных морозильных установках, может не хватить, потому что время их замораживания составляет от суток и более. В таких случаях можно применить мобильный комплекс противотепловой средств МКПС «Зима-А», который позволяет на ходу с помощью жидкого азота заморозить 480 шт. ОЭ-3 в течение (80...120) мин. с возможностью сохранения их в вагонетках-термосах.

## 9.2. Конструктивные решения, технические характеристики средств для противогазотепловой одежды и охлаждающего пакета

Мобильный комплекс противотепловых средств с использованием сжатого воздуха (рис. 9.7) с технической характеристикой (табл. 9.9-9.11) предназначенный для предварительной доставки на аварийную шахту замороженных ОЭ-3, их дальнейшего замораживания на поверхности или в горных выработках, хранения, доставки в шахту непосредственно к месту ведения аварийно-спасательных работ в противогазотепловой одежде. По сравнению с рис. 7.9 (см. подраздел 7.5.3) он является аналогичным по конструктивному исполнению.

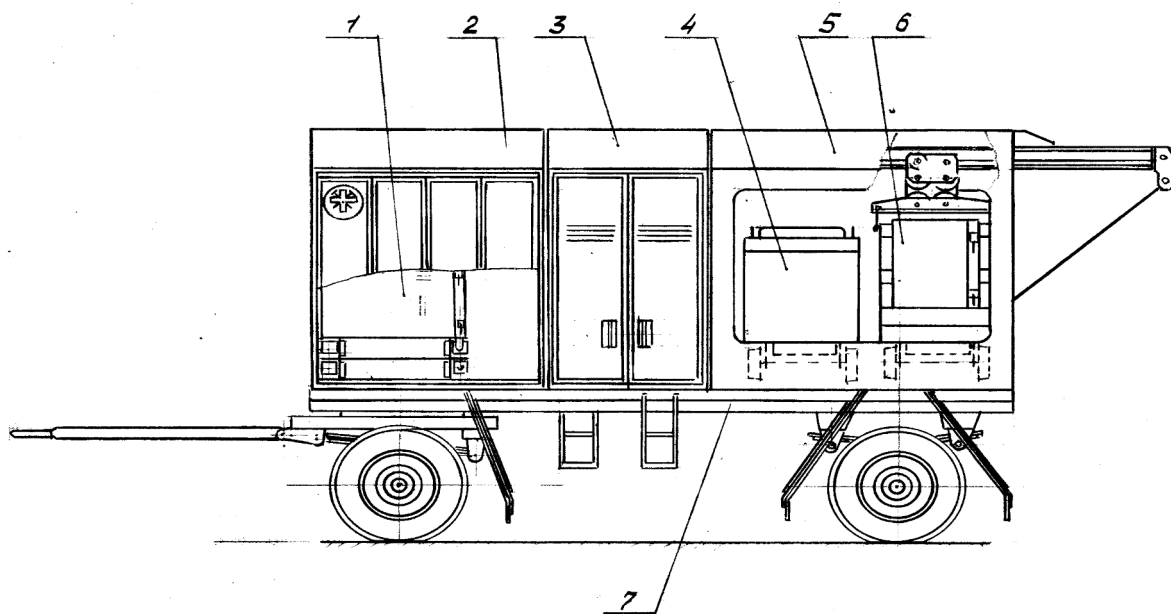


Рис. 9.7. Мобильный комплекс противотепловых средств «Зима-В»: 1 – наземная воздушно-морозильная установка; 2 – переносная шахтная воздушно-морозильная установка; 3 – шкаф для противотепловой одежды и запасных частей; 4 – вагонетка-термос; 5 – грузоподъемное устройство; 6 – передвижная шахтная воздушно-морозильная установка; 7 – прицеп

Таблица 9.9

Техническая характеристика наземной воздушно-морозильной  
установки УВМН

Наименование показателя	Значение показателя
1. Давление воздуха на входе в установку, МПа, не менее	0,45
2. Расход воздуха при давлении на входе в детандер турбохолодильника 0,4 МПа, м <sup>3</sup> /с, не более при воздушном (водяном) охлаждении теплообменника	0,41 (0,20)
3. Расход воды, м <sup>3</sup> /ч, не более	10
4. Тип турбохолодильников	1277ТД (3263, 3263А)
5. Количество турбохолодильников	4
6. Количество загружаемых в холодильную камеру ОЭ-3, ед., не более	300
7. Количество замораживаемых за один цикл * ОЭ-3 до температуры минус 10 °С ед., не менее	400
8. Диапазон номинальной температуры воздуха на входе в холодильную камеру при температуре на входе в установку не более 60 °С, °С	от минус 22 до минус 16
9. Продолжительность цикла замораживания с заменой новыми ОЭ-3 при номинальной температуре, мин, не более при воздушном (водяном) охлаждении теплообменника	140 (90)
10. Масса, кг, не более	1100
11. Габаритные размеры, мм, не более:	
длина	2268
ширина	1075
высота	1125
12. Срок службы, лет не менее	10

\* Цикл замораживания определяется интервалом времени с момента выведения установки на рабочий режим до окончания замораживания ОЭ-3 с учетом перезакладки 100 ед. через 60 – 70 мин работы в холодильной камере.

Таблица 9.10

Техническая характеристика передвижной шахтной  
воздушно-морозильной установки УВМШ

Наименование показателя	Значение показателя
1. Давление воздуха на входе в установку, МПа, не менее	0,45
2. Расход воздуха при давлении на входе в детандер турбохолодильника 0,4 МПа, м <sup>3</sup> /с, не более	
при воздушном предохлаждении теплообменника	0,41
при водяном предохлаждении теплообменника	0,20



3. Тип турбохолодильников	1277ТД (3263, 3263А)
4. Количество турбохолодильников, ед.	2
5. Расход воды, м <sup>3</sup> /ч, не более	7
6. Количество ОЭ-3 в холодильной камере, ед., не более	175
7. Количество замораживаемых за один цикл ОЭ-3 до температуры минус 10 °С, ед., не менее	225
8. Диапазон номинальной температуры воздуха на входе в холодильную камеру при температуре на входе в установку не более 60 °С, °С	от минус 20 до минус 17
9. Продолжительность цикла замораживания с перезакладкой ОЭ-3 при номинальной температуре, мин, не более при воздушном охлаждении теплообменника при водяном охлаждении теплообменника	100 60
10. Ширина колеи колесной пары, мм	600, 900
11. Масса, кг, не более	950
12. Габаритные размеры, мм, не более длина ширина высота	2100 1050 1430
13. Срок службы, лет, не менее	10

Таблица 9.11

Техническая характеристика переносной шахтной  
воздушно-морозильной установки УПМШ

Наименование показателя	Значение показателя
1. Давление воздуха на входе в установку, МПа, не менее	0,45
2. Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с, не более	0,40
3. Количество ОЭ-3 в холодильной камере, ед., не менее	52
4. Время замораживания ОЭ-3 до температуры минус 10 °С при температуре в холодильной камере минус 25 °С, мин, не более	30
5. Холодопроизводительность вихревой трубы, кВт, не менее	0,15
6. Количество вихревых труб, ед.	8
7. Масса, кг, не более	38
8. Габаритные размеры, мм. не более: длина ширина высота	900 500 850
9. Срок службы, лет, не менее	10

Тактика применения мобильного комплекса противотепловых средств «Зима-В» состоит в следующем.

МКПС «Зима-В» в составе наземной УВМН, двух шахтных воздушно-морозильных установок УВМШ и УПМШ, вагонетки-термоса, шкафа для размещения в нем противотепловых курток, костюмов, комплектующих и запасных изделий транспортируется автомобилем-тягачем. Комплекс предназначен для подразделений ГВГСС, как и «Зима-А», и должен обслуживаться водителем и двумя респираторщиками, которые имеют допуск к его работе.

МКПС «Зима-В» должен находиться в состоянии ожидания в боксе гаража при температуре не ниже плюс 5 °С и быть готовым к немедленному выезду на аварийную шахту.

В подразделении ГВГСС, оснащённом МКПС «Зима-В», в стационарной морозильной камере, каждого взвода должны храниться в замороженном состоянии ОЭ-3 не менее чем на два отделения респираторщиков, для работы в куртках или костюмах. Замороженные в этих камерах при температуре не выше минус 10 °С и не ниже минус 30 °С ОЭ-3 должны быть уложены в контейнеры К-2 вертикально в три ряда в количестве не менее 52 ед., которые затем помещают в камеру.

При получении приказа о выезде на аварийную шахту для ведения аварийно-спасательных работ в экстремальных микроклиматических условиях необходимо загрузить имеющиеся в стационарной морозильной камере контейнеры К-2 в вагонетку-термос МКПС «Зима-В».

Холодильные камеры морозильных установок должны быть заполнены не замороженными охлаждающими элементами в своих контейнерах в количестве 175 ед. (с перезарядкой ОЭ-3 – 225 ед.) в УВМШ, 52 ед. в УПМШ и 300 ед. (с перезарядкой ОЭ-23 – 400 ед.) – в УВМН.

По прибытии на шахту комплекс располагается на горизонтальной площадке под открытым небом или под навесом. С боковых сторон установки должно быть свободное пространство шириной не менее 2-х метров, необходимое для размещения контейнеров. Сзади прицепа размещаются установка УВМШ и вагонетка-термос, снятые с прицепа при помощи грузоподъемного устройства, а установка УПМШ снимается с прицепа вручную с помощью двух респираторщиков.

Установка УВМШ может применяться:

- совместно с наземной морозильной установкой в случае необходимости увеличения количества применения ОЭ-3 при ликвидации сложных аварий;
- на поверхности шахт от передвижных компрессоров при отсутствии стационарных шахтных компрессорных установок;
- в горной выработке на свежей струе при наличии рельсового пути, если затруднена доставка ОЭ-3 в вагонетке-термосе с поверхности шахт или контейнерах К-2.

Установка УПМШ должна размещаться в горной выработке шахты на свежей струе.

В зависимости от сложности и условий ликвидации последствий аварий в шахтах, а следовательно потребности использования различного количества ОЭ-3 в противотепловой одежде, необходимо применять соответственно различное сочетание установок согласно их техническим характеристикам. В каждом конкретном случае в зависимости от температуры окружающей среды и параметров сжатого воздуха стационарной компрессорной станции шахты или передвижных компрессоров определяется длина пневмотрубопроводов (см. рис. 4.4) и время замораживания ОЭ-2 для установки УВМШ по номограмме, приведенной на рис. 4.10, а для установки УВМН необходимо увеличить это время в 1,24 раза.

При необходимости увеличения производительности установки УВМН необходимо использовать водяное предохлаждение с помощью водофильтрующего устройства, или совместно с установкой УВМШ с тем или иным предохлаждением теплообменников.

В горных выработках шахты при необходимости обеспечения максимальной производительности можно использовать установку УВМШ с водяным охлаждением теплообменника, в противном случае – совместно с установкой УПМШ.

Для хранения и доставки замороженных ОЭ-3 к месту ведения аварийно-спасательных работ можно применять вагонетку-термос и (или) теплоизолирующие контейнеры К-2.

В случае доставки ОЭ-3 в шахту в контейнерах К-2 или в вагонетке-термосе у ствола, они передаются ответственному за доставку горноспасателю под расписку в рабочем журнале.

Вагонетка-термос позволяет длительное время сохранять ОЭ-3 в замороженном состоянии (в 5-8 раз больше, чем в контейнерах К-2). Ее необходимо использовать для доставки ОЭ-3 на подземную базу для длительного их хранения, а также для накопления резерва ОЭ-3 на поверхности шахты.

После доставки на подземную базу вагонетка-термос должна быть установлена двумя горноспасателями так, чтобы не мешать маневрированию шахтных вагонеток, в которых доставляются материалы и горноспасательное оборудование.

При замораживании охлаждающих элементов в холодильной камере наземной установки УВМН необходимо проделать операции в следующей последовательности:

- подсоединить с помощью трубопроводов, входящих в комплект принадлежностей, коллектор к пневмосети или к компрессорам сжатого воздуха;
- открыть входной вентиль;
- проверить правильность укладки ОЭ-3 в контейнерах холодильной камеры, для чего открыть ее дверь холодильника и поочередно выдвигая на 2/3 длины контейнеры, начиная с верхних, убедиться, что они находятся на своих местах, после чего вернуть контейнеры в исходное положение, закрыть дверь камеры;
- открыть вентиль подачи сжатого воздуха из пневмосети или компрессоров;

- постепенно, открывая вентили подачи воздуха в детандеры турбохолодильников, поддерживать давление воздуха около 0,45 МПа, при этом расход воздуха должен быть около 0,41 м<sup>3</sup>/мин при воздушном и 0,20 м<sup>3</sup>/мин при водяном предохлаждении теплообменника;

- постепенно открыть вентили турбохолодильников и начать процесс замораживания ОЭ-3;

- через 60-70 мин с момента выведения установки на рабочий режим извлечь из холодильной камеры установки 100 ед. ОЭ-3 (четыре контейнера), находящихся в двух первых контейнерах по ходу подачи воздуха от каждого турбохолодильника камеры;

- взамен этих контейнеров поместить в холодильную камеру четыре новых контейнера с ОЭ-3, и вновь включить установку в работу, продолжая замораживание до того момента времени, когда максимальная продолжительность цикла с учетом заполнения новыми ОЭ-3 составит 140 мин (общее количество замороженных ОЭ-3 в камере составит 400 ед.);

- закрыть вентиль подачи сжатого воздуха от пневмосети или от компрессоров;

- открыть дверь холодильника, извлечь контейнеры с ОЭ-3 и быстро переложить их в контейнеры К-2;

- отправить контейнеры К-2 с ОЭ-3 с респираторщиками в шахту к месту их применения.

При необходимости увеличения производительности замораживания ОЭ-3 дополнительно необходимо использовать установку УВМШ.

Операции по замораживанию ОЭ-3 в холодильной камере установки УВМШ необходимо проделать в той же последовательности, как и в наземной установке, с той лишь разницей, что через 60-70 мин с момента выведения установки на рабочий режим необходимо извлечь из камеры 50 ОЭ-2, находящихся в двух первых по ходу воздушного потока контейнерах, а вместо них поместить в нее два новых контейнера с ОЭ-3, и вновь включить установку в работу, продолжая замораживание до того момента времени, когда продолжительность цикла с учетом перезакладки ОЭ-3 составит 100 мин. Общее количество замороженных ОЭ-3 в установке составит 225 ед.

Давление воздуха на входе в детандеры турбохолодильников должно быть не более 0,4 МПа, которое обеспечивается с помощью вентиля на входе в установку.

Расход воздуха через установку УВМШ при воздушном предохлаждении равно примерно 13 м<sup>3</sup>/мин, при водяном – 6,5 м<sup>3</sup>/мин.

При работе установок с водяным предохлаждением необходимо выполнить следующие операции:

- перекрыть вентили детандера турбохолодильника предохлаждения на входе и выходе из него воздуха;

- подключить коллектор подачи воды к трубопроводу шахтной сети;

- постепенно открывая вентиль подачи воды, обеспечить расход воды 10 м<sup>3</sup>/ч для наземной установки УВМН и 7 м<sup>3</sup>/ч – для шахтной УВМШ.

После каждого цикла замораживания ОЭ-3 в установках УВМН и УВМШ необходимо слить жидкость из фильтров-влагоотделителей.

При использовании переносной морозильной установки с вихревыми трубами УПВШ необходимо с помощью трубопровода длиной 20 м и более подсоединить ее к пневмосети, открыть вентиль на входе и обеспечить необходимую производительность замораживания ОЭ-3 согласно технической характеристике.

По завершении аварийно-спасательных работ необходимо принять меры к восстановлению готовности установок к применению согласно руководству по эксплуатации.

До настоящего времени МКПС «Зима-В» эффективно использовался в первом военизированном горноспасательном отряде (1-м ВГСО) г. Горловка Донецкой области.

Водоледяной аккумулятор холода – охлаждающий элемент ОЭ-3 (рис. 9.8), секции которого полностью заполнены водой, предназначен для активного теплосъема организма человека в противотепловой одежде.

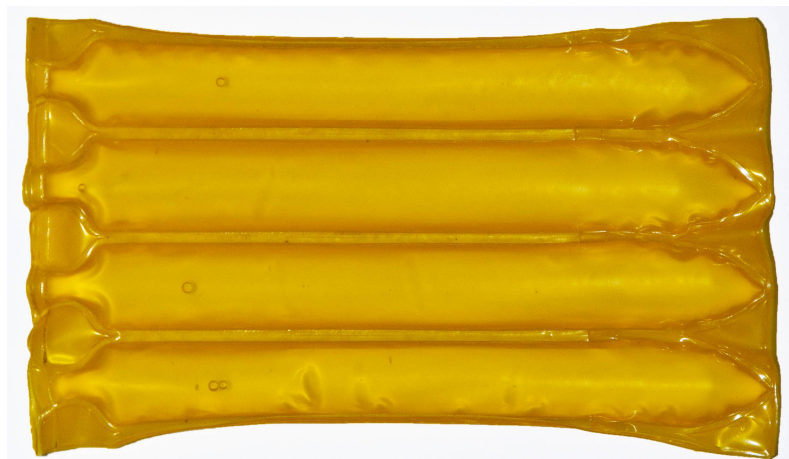


Рис. 9.8. Водоледяной аккумулятор холода – охлаждающий элемент ОЭ-3

Конструктивное исполнение и технология изготовления ОЭ-3, выполненного из поливинилхлоридной пленки и ОЭ-2 – из полиэтиленовой пленки толщиной 0,15 мм и 0,40 мм аналогичны.

Сравнительная техническая характеристика охлаждающих элементов ОЭ-2 и ОЭ-3 приведена в таблице 9.12, при незначительном увеличении массы ОЭ-3 с толщиной оболочки 0,4 мм, количество их применений увеличилось не менее, чем в 20 раз.

Переносной теплоизолирующий контейнер К-2 (рис. 9.9) предназначен для доставки в горные выработки к месту ведения работ, хранения и оснащения одежды охлаждающими элементами ОЭ-3.

Сравнительная техническая характеристика ОЭ-2 и ОЭ-3

Наименование показателя	Значение показателя	
	Наименование ОЭ	
	ОЭ-2	ОЭ-3
Температура замораживания, °С	от минус 10 до минус 60	от минус 10 до минус 60
Количество применений, раз, не менее	от 2 до 10	330
Масса, кг, не более	0,173	0,200
Габаритные размеры, мм, не более		
длина	212	212
ширина	105	105
высота	20	20



Рис. 9.9. Переносной теплоизолирующий контейнер К-2

Он состоит из наружного слоя – винилискожи, среднего – двух пенополиуретановых пластин, между которыми находится воздушная прослойка, образованная с помощью приклеенных по краям и в центре пяти прокладок из пенополиэтилена, внутреннего – прорезиненной ткани и аналогичной ткани (съемной), расположенной в верхней части заполненного ОЭ-3 контейнера, ручки и плечевых ремней, с возможностью переносить его в руках, на плечах и спине.

Сравнительная техническая характеристика контейнера К-2 с толщиной полиэтиленовой пленки ОЭ-2  $\delta=0,15$  мм и ОЭ-3 – поливинилхлоридной пленки  $\delta=0,40$  мм приведена в таблице 9.13.

Таблица 9.13

## Техническая характеристика контейнера К-2

Наименование показателя	Значение показателя ОЭ	
	ОЭ-2	ОЭ-3
Количество ОЭ, шт.	60	60
Время хранения в замороженном виде при начальной их температуре минус $10^{\circ}\text{C}$ , конечной минус $3^{\circ}\text{C}$ и температуре воздуха окружающей среды $30^{\circ}\text{C}$ , мин, не менее	360	600
Масса, кг, не более	11,2	12,7
Габаритные размеры, мм, не более длина ширина высота	520 200 400	
Средний срок службы, лет, не менее	3	

Отсюда следует, что при увеличении массы контейнера с ОЭ-3 на 1,6 кг, оболочка которых выполнена из поливинилхлоридной пленки толщиной 0,40 мм, а секции полностью заполнены водой, время их хранения до температуры минус  $3^{\circ}\text{C}$  увеличивается в 1,7 раза.

Передвижной теплоизолирующий контейнер (вагонетка-термос) ПВТ (рис. 9.10) предназначен для хранения, доставки в горные выработки шахт и к месту ведения горноспасательных работ замороженных ОЭ-3 и состоит из рамы, скатов, поручней, крышки, замков, кузова и пробки.

Наружный и внутренний слои контейнера выполнены из нержавеющей стали, теплоизолирующий – из полистерола толщиной  $8 \cdot 10^{-2}$  м. Внутренний объем ПВТ разделен перегородкой и вместе с крышкой делит его на две равные части для последовательного извлечения ОЭ-3.

Общий вид передвижного теплоизолирующего контейнера (вагонетки-термоса) ПВТ и его техническая характеристика приведены на рис. 9.10 и в таблице 9.14.



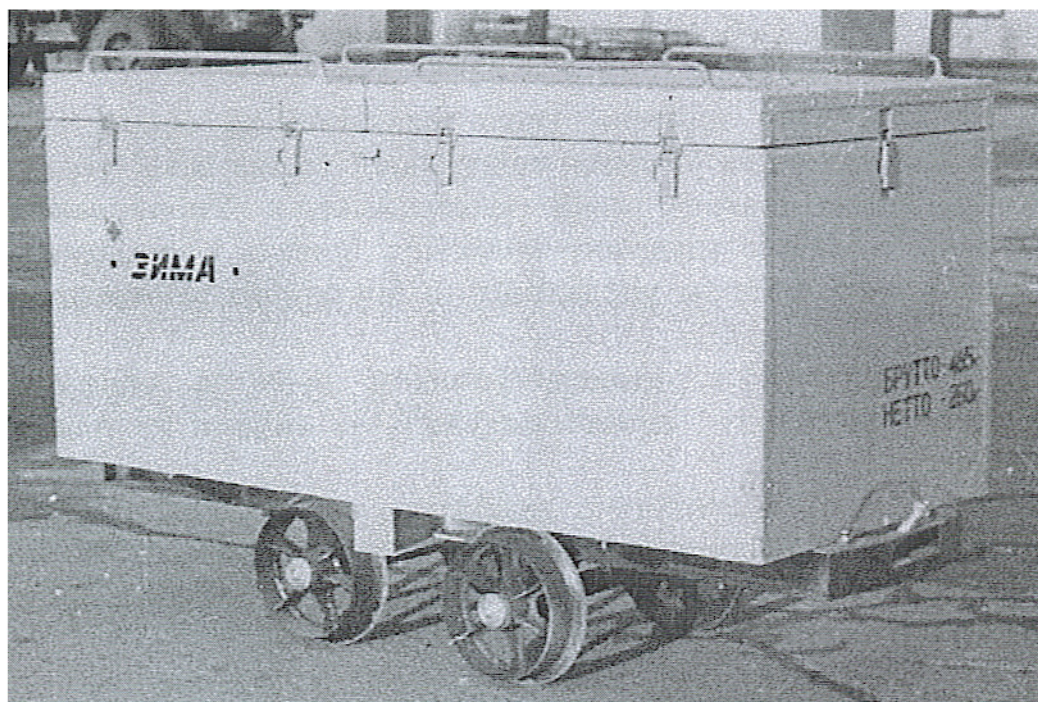


Рис. 9.10. Передвижной теплоизолирующий контейнер (вагонетка-термос) ПВТ

Таблица 9.14

Техническая характеристика передвижного контейнера ПВТ

Наименование показателя	Значение показателя
Масса, брутто, кг, не более	490
Колея, мм	600 или 900
Количество помещаемых переносных контейнеров, шт	10
Количество помещаемых ОЭ-3, шт, не менее	1000
Диаметр колеса, мм	300
Габаритные размеры, мм, не более	
длина	2100
ширина	900
высота	1440

Использование ОЭ-3 с толщиной оболочки 0,40 мм в противотепловой куртке ТК-50, предназначенной для защиты от теплового воздействия воздуха окружающей среды и органов дыхания в непригодной для дыхания среде при температуре до 60 °С и относительной влажности до 100%, дало возможность увеличить время ее защитного действия на 25 %. Сравнительная техническая характеристика куртки ТК-50 с двумя вышеприведенными ОЭ-2 и ОЭ-3 приведена в таблице 9.15.



Сравнительная техническая характеристика противотепловой куртки  
ТК-50 с ОЭ-2 и ОЭ-3

Наименование показателя	Значение показателя ОЭ	
	ОЭ-2	ОЭ-3
Время защитного действия, мин, при относительной влажности воздуха 100 % и температуре, °С		
30	150	188
40	40	50
50	30	38
60	10	13
Количество ОЭ, шт	15	15
Масса с ОЭ, кг, не более	4,3	4,8
Средний срок службы, лет, не менее	5	5

Учитывая тот факт, что куртки ТК-50 горноспасатели применяют, как правило, при температуре воздуха окружающей среды до 40 °С, а при более высокой – костюмы ТК-60М, срок их защитного действия в этом диапазоне температур существенно увеличивается. Это дает возможность увеличить время и сократить затраты на ведение аварийно-спасательных работ в условиях повышенной температуры.

Необходимо отметить следующее. В последнее время в Украину поступают из-за рубежа противотепловые жилеты фирмы «Дрегерверк», в карманах с отверстиями в которых в качестве аккумуляторов холода используются пакеты с солью в твердом состоянии. При повышении температуры до 28 °С соль переходит в жидкое состояние и за счет эндотермической реакции создается охлаждающий эффект. Одна из шахт приобрела 200 таких жилетов.

В НИИГД «Респиратор» проведены испытания жилета в тепловой камере при температурах 30, 35 и 40 °С и средней нагрузке на испытателя с целью его возможности применения в шахтных условиях. Результаты испытаний показали, что охлаждение в нем происходит только при плотном его прилегании к туловищу испытателя, т.е., за счет теплопроводности, а время защитного действия практически одинаковое при применении горноспасателями спецодежды с респираторами. Кроме этого, при испытании жилета в течении 6-ти часов испытатель впервые получил радикулит. Это вызвано тем, что в отличие от водолеяного конвективно-лучистого охлаждения, где пот конденсируется в воздушном пространстве между элементами и телом человека, в данном случае происходит, так называемый «парниковый эффект». Эти жилеты не рекомендованы к применению в шахтных условиях, а они

были сданы на склад, т.к. трое горнорабочих в течение короткого времени получили воспаление легких.

Пакет химический охлаждающий ПХО (рис. 9.14, а) предназначен для оказания доврачебной помощи пострадавшим за счет местного охлаждения тканей организма, профилактики и купирования теплового удара в условиях тепловой нагрузки, а также снижения болевого синдрома при механических и термических травмах.



а



б



в



г

Рис. 9.111. Пакет химический охлаждающий ПХО и его составные части: а – общий вид; б – наружная оболочка с фиксированным устройством; в – малая с водой и большая емкости с химическими ингредиентами; г – теплоизолирующая оболочка

Пакет (рис.9.11,а) состоит из наружной оболочки с фиксирующим устройством (рис. 9.11, б), малой с водой и большой (рис 9.11,6, в) емкостей с химическими ингредиентами, теплоизолирующей оболочки (рис 9.11 г).

Меньшая емкость в виде кармана, образованная ромбовидной пластиной, сварена с одной из внутренних стенок большой емкости. При этом ромбовидная пластина изготовлена из полимерного материала меньшей толщины, чем боковая стенка большей емкости. Такое исполнение охлаждающего пакета улучшает эксплуатационные характеристики за счет обеспечения надежности при использовании в условиях повышенной температуры, так как приводит к распределению внешнего усилия для разрыва кармана только на два острых угла ромба, что уменьшает усилие при использовании пакета.

Изготовление пакета проводится в такой последовательности:

- вырезают заготовки ромбовидной формы малой емкости и прямоугольной формы большой емкости;
- для малой емкости заготовку сваривают швами с заготовкой большой емкости;
- через прокол в заготовке заполняют водой и затем герметизируют емкость швом;
- изготовленную малую емкость большой стороной прямоугольной формы сваривают с заготовкой швами, заполняют карбамидом, азотнокислым аммонием по  $(100 \pm 5)$  г и силикагелем  $(5 \pm 0,5)$  г, герметизируют большую емкость швом;
- емкость с ингредиентами укладывают вместе с теплоизолирующей оболочкой и инструкцией по эксплуатации в наружную оболочку и герметизируют с помощью застежки;
- фиксирующее устройство в виде бесконечной ленты предварительно сваривают на одной из сторон наружной оболочки.

Наружная оболочка изготовлена из материала полипропилен, малые и большие емкости – полиэтиленовой пленки толщиной 0,15 и 0,10 мм, причем малая емкость меньшей толщины – для снижения усилия при активации, теплоизолирующая оболочка – пенофенола толщиной 2 мм, фиксирующее устройство – полиэтиленовой пленки толщиной 2 мм.

Для активации ингредиентов охлаждающий пакет необходимо сжать пальцами рук, меньшая ромбовидной формы емкость с водой разрывается в области одной из вершин ромба от усилия, которое возникает в середине меньшей емкости и вода поступает в большую емкость с химическими ингредиентами: нитратом аммония, карбамидом и силикагелем, который необходим для увеличения длительности хранения солей в сухом виде. После интенсивного встряхивания (от семи до десяти раз) пакета его прикладываем к участкам тела пострадавшего для снятия тепла или снижения болевого синдрома.

Сравнительная техническая характеристика пакета ПХО, на который получен патент, с костюмом экстренного охлаждения пострадавших КЭОП приведена в таблице 9.16.

## Техническая характеристика пакета химического охлаждающего ПХО

Наименование показателя	Значение показателя	
	Пакет ПХО	Костюм КЭОП
Время охлаждающего действия при температуре воздуха окружающей среды 303 К (плюс 30 °С), мин, не менее	30	45
Время приведения в действие, с, не более	120	300
Усилие, прикладываемое к пакету для его активации, Н, не более	150	—
Время восстановления теплового состояния пострадавших, мин, не более	22	30
Количество используемых пакетов, ОЭ-2, шт, не более	6	28
Общая масса, кг, не более	2,2	7,8
Габаритные размеры, мм, не более		
длина	220	2000
ширина	150	450
высота	32	150
Срок службы, лет, не менее	1	5

Несмотря на меньшее время охлаждающего действия пакета ПХО, время восстановления теплового состояния с помощью восьми пакетов в 1,2 раза меньше, чем при использовании костюма КЭОП, время приведения в действие быстрее в 2,5 раза, масса меньше примерно в 3,0 раза. Кроме этого, для применения костюма КЭОП необходимо иметь на оснащении морозильную установку, теплоизолирующий контейнер К-2, водолеяные ОЭ, транспортную сумку, что связано, при отсутствии средств индивидуальной противотепловой защиты, с большими материальными затратами.

Разработаны нормативные документы: СОУ 10-10.1.00174102-015-2010. Средства индивидуальной противотепловой защиты горнорабочих, Общие технические требования и методы испытаний; СОУ 10.1.00174102-020-2012. Специальные профессиональные тренировки основного состава Государственной военизированной горноспасательной службы и членов вспомогательных горноспасательных команд угольных шахт. Общие требования и методы проведения.

Разработанные вышеприведенные методы и средства индивидуальной противогазотепловой защиты эффективно используются подразделениями ГВГСС, рабочими металлургической промышленности (ОЭ-3, К-2, ПХО), горнорабочими (ПХО) и могут быть применены в других отраслях хозяйства,

в которых работники выполняют работу в условиях повышенной температуры окружающей среды, обеспечивая повышение безопасности труда, снижая затраты на ведение аварийно-спасательных работ, сохраняя их жизнь и здоровье.

## Список литературы

1. Чумак А.С. Загазирование шахт центрального района Донбасса продуктами химических производств / А.С. Чумак., Б.А. Грядущий., А.Г. Недавний // Уголь Украины. – 1991. – № 1. – С. 31 – 33.
2. Мычко А.А. Разработка методов оценки защитных свойств и выбора текстильных материалов для специальных изделий в экстремальных условиях : дис.... докт. техн. наук: спец.0526.01 «Охрана труда» / Санкт-Петербург – Северодонецк, 1997. – 568 с.
3. Очкурено В.И. Разработка методов оценки и исследования свойств материалов для верха кислотозащитной специальной обуви: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.26.01 «Охрана труда». – Л. : 1990. – 18 с.
4. Онасенко А.А., Комплексный показатель шахтного микроклимата – Термоиндекс / А.А. Онасенко, Ю.В. Клименко Ю.В., В.В. Карпекин // 10-я Пленарная сессия международного бюро по Горной теплофизике «18 MT2005» – Гливице (Польша): Силезский Политехнический институт, 2005. – С. 455 – 459.
5. Онасенко А.А. Обоснование параметров средств индивидуальной противогазотепловой защиты горнорабочих: дис...канд. техн. наук: 05.26.01 «Охрана труда» / МакНИИ.– Макеевка, 2010.– 187 с.
6. Клименко Ю.В. Методы и средства индивидуальной защиты горноспасателей в экстремальных микроклиматических условиях.: дис... канд. техн. наук: спец. 05.26.01 «Охрана труда» / Горный институт. –Днепропетровск, 2003. – 189 с.
7. Клименко Ю.В. Воздействие лучистого потока на человека при тушении подземного пожара / Ю.В. Клименко, И.Ф. Марийчук// Науковий вісник НГА України.- Дніпропетровськ, 2002.– №1.– С.46-49.
- 8 . Онасенко А.А. Теоретические основы тепломассопереноса в газозащитном костюме с водолеяной системой охлаждения // Проблемы экологии: Сб. науч. тр. ДонНТУ. – Донецк, 2005. – № 6. – С. 67 – 77.
9. Онасенко А.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в противогазотепловом костюме с водолеяными охлаждающими элементами / А.А. Онасенко, И.Ф.Марийчук //Форум гірників 2005: матер. міжнарод. конф., 12 – 14 жовтня 2005. – Т.3. – Днепропетровск: ГНУ, 2005. – С. 206 – 214.
10. Пашковский П.С. Процессы тепломассопереноса в противогазотепловом костюме / П.С. Пашковский., А.А. Онасенко // Тезисы III Международной научно-практической конф. «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация», 2005. – Минск. – 2005, Т3. – С. 215 – 216.
11. Теплообменные процессы в аккумуляторе холода противотепловой одежды / И.Ф. Марийчук, В.Н.Попов, В.О.Положий, А.А. Онасенко // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД.– Донецк, 2007. – Вып. 44. – С. 130 – 135.

12. Гаврилко А.А. Разработка метода и технических средств обеспечения безопасности пожарных при эрготермических нагрузках: дис... канд. техн. наук: спец. 05.26.01 «Охрана труда» / УкрНИИПБ. – Киев.- 2005. – 177 с.

13. Гаврилко О.А. Математичне моделювання нестационарного переносу тепла в захисному одязі пожежних і гірничорятувальників з водольодяною системою охолодження / О.А. Гаврилко // Пожежна безпека: зб. наук. праць, ЛПБ: УкрНДПБ МНС України. – Львів. 2002. – С. 76 –82.

14. Гаврилко А.А. Теоретические исследования динамики расхода жидкости в системе охлаждения ног пожарного / А.А. Гаврилко, И.Ф. Марийчук, А.В.Ревякин // Научный вестник УкрНДПБ/. – 2002, № 2. – С. 217 – 222.

15. Гаврилко А.А. Моделирование динамики температур в системах местного охлаждения защитной одежды пожарных / А.А. Гаврилко // Пожежна безпека: зб. наук. праць, УкрНДПБ МНС України. – Львів, 2004. - №4. С. 20-25.

16. Гаврилко О.А. Математичне моделювання нестационарного переносу тепла в захисному одязі пожежних і гірничорятувальників з водольодяною системою охолодження / О.А. Гаврилко // Пожежна безпека: зб. наук. праць, ЛПБ: УкрНДПБ МНС України. – Львів. 2002. – С. 76 –82.

17. Гаврилко А.А. Моделирование динамики температур в системах местного охлаждения защитной одежды пожарных / А.А. Гаврилко // Пожежна безпека: зб. наук. праць, УкрНДПБ МНС України. – Львів, 2004. - №4. С. 20-25.

18. Онасенко А.А. Теплообменные процессы в системе «окружающая среда – охлаждающий жилет – человек» / А.А. Онасенко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2005. – Вып. 42. – С. 120 – 125.

19. Онасенко А.А., Вольский В.А., Карпекин В.В. Энергозатраты человека в экстремальных микроклиматических условиях / В.А. Вольский, В.В. Карпекин // Уголь Украины. – 2005. – № 9. – С. 38 – 39.

20. Определение тепловой устойчивости горноспасателей в воздухо- и паронепроницаемом костюме / И.Ф.Марийчук, А.С.Чумак, В.И.Макарцев, М.М.Величко, Ю.В. Клименко // Отраслевой стандарт Украины – ГСТУ 33.1.04675545.005-2002–17с.

21. Карпекин В.В. Энергозатраты организма членов аварийно-спасательных подразделений при ходьбе с грузом / В.В. Карпекин, А.А. Гаврилко // Уголь Украины. – 2003. – №6. – С. 19 – 23.

22. Вольский В.А. Энергетические показатели пожарных при передвижении в аварийной обстановке / А.А., Гаврилко, И.Ф.Марийчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр./ НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2003. – С. 51 – 55.

23. Воронов П.С. Обоснование параметров и создание комплекса противотепловой защиты горноспасателей с использованием сжатого воздуха: дис...канд. техн. наук: 05.26.01 «Охрана труда» / МакНИИ. – Макеевка, 2008. – 176 с.



24. Воронов П.С. Установка для замораживания охлаждающих элементов к противотепловым средствам горноспасателей / П.С. Воронов, И.Ф. Марийчук // Уголь Украины. – 2003. – № 11. – С. 12–14.

25. Воронов П.С. Теоретические и экспериментальные исследования по разработке переносных морозильных установок противотепловых средств горноспасателей с использованием вихревых труб / П.С. Воронов, И.Ф. Марийчук, В.А. Вольский / Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.

26. Воронов П.С. Моделирование процессов замораживания водяных охлаждающих элементов для противотепловой одежды // П.С. Воронов, И.Ф. Марийчук // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.

27. Воронов П.С. Температурный режим и гидравлические параметры пневмотрубопроводов воздушных установок для замораживания охлаждающих элементов/ П.С. Воронов, И.Ф. Марийчук// Горноспасательное дело: сб. науч. тр./ НИИГД «Респиратор».– Донецк, 2003. – С.44 – 51.

28. Положий В.О. Усовершенствование индивидуальных средств охлаждения горнорабочих в условиях повышенной температуры шахтного микроклимата: дис...канд. техн. наук: 05.26.01 «Охрана труда» / МакНИИ.– Макеевка, 2013.– 173 с.

29. Наследственное напряженно-деформированное состояние оболочки водолеяного аккумулятора холода / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук, Ю.А. Петренко, А.О. Новиков // Вісті Донецького гірничого інституту: Зб. наук. праць ДонНТУ.– Донецьк, 2009.– № 1.– С. 12-19.

30. Многократное применение охлаждающих элементов противотепловой одежды / Положий В.О., Марийчук И.Ф., Попазова О.В., Гаврилко А.А. // Горноспасательное дело: сб. науч. тр./ НИИГД «Респиратор».– Донецк, 2012.– Вып. 49.– С. 165-172.

31. Наследственное напряженно-деформированное состояние оболочки водолеяного аккумулятора холода / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук, Ю.А. Петренко, А.О. Новиков // Вісті Донецького гірничого інституту: Зб. наук. праць ДонНТУ.– Донецьк, 2009.– № 1.– С. 12-19.

32. Многократное применение охлаждающих элементов противотепловой одежды / Положий В.О., Марийчук И.Ф., Попазова О.В., Гаврилко А.А. // Горноспасательное дело: сб. науч. тр./ НИИГД «Респиратор».– Донецк, 2012.– Вып. 49.– С. 165-172.

33. Марийчук И.Ф. Математическая формулировка задач исследований теплообменных процессов в контейнере с водолеяными аккумуляторами холода / И.Ф. Марийчук, В.О. Положий // Вісті Донецького гірничого інституту: Зб. наук. праць ДонНТУ.– Донецьк, 2008.– № 1.– С. 44-54.

34. Положий В.О. Процессы теплообмена в контейнере с охлаждающими элементами в период их использования / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук // Вісті Донецького гірничого інституту: Зб. наук. праць ДонНТУ.– Донецьк, 2008.– № 2.– С. 3-13.

35. Положий В.О. Моделирование теплообменных процессов в контейнере с водолеяными аккумуляторами холода / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. /НИИГД «Респиратор».– Донецк, 2008.– Вып. 45.– С. 147-157.



36. Положий В. О. Теплообменные процессы в охлаждающем пакете с химическими ингредиентами / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук, Т.А. Лазаренко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. /НИИГД «Респиратор».– Донецк, 2009.– Вып. 46.– С. 134-141.

37. Теплообменные процессы в пакете для оказания помощи пострадавшим при перегревании и механических травмах / [В.О. Положий, И.Ф. Марийчук, Ю.А. Петренко, Н.И. Шилинговский // Вісті Донецького гірничого інституту: зб. наук. праць ДонНТУ.– Донецьк, 2010.– № 1.– С. 95-100.

38. Положий В.О. Обоснование состава и массы химических ингредиентов охлаждающего пакета / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук, Н.И. Шилинговский // Уголь Украины.– 2010.– № 6.– С. 28-31.

39. Теплообменные процессы в системе «окружающая среда – охлаждающий пакет – человек» / Мамаев В.В., Положий В.О., Марийчук И.Ф., Новиков А.О. // Вісті Донецького гірничого інституту: зб. наук. праць ДонНТУ.– Донецьк, 2012.– № 1.– С. 157-165.

40. Положий В.О. Теплообменные процессы в охлаждающем пакете с химическими ингредиентами / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук, Т.А. Лазаренко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. /НИИГД.– Донецк, 2009.– Вып.46.–С. 134–141.

41. Положий В.О. Эффективность применения химических охлаждающих пакетов / В.О. Положий, Т.А. Лазаренко, А.А. Гаврилко // Уголь Украины.– 2009.– № 11.– С. 23-25.

42. Положий В.О. Индивидуальная противогазотепловая защита / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук // Уголь Украины.– 2008.– № 12.– С. 26-28.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИ РАБОТЕ ГОРНОРАБОЧИХ И ЧЛЕНОВ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ.....</b>	<b>5</b>
<b>2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ..</b>	<b>11</b>
<b>3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ГОРНОСПАСАТЕЛЕЙ (ЧЛЕНОВ ВГК ШАХТЫ).....</b>	<b>26</b>
3.1. Комплексная оценка шахтного микроклимата.....	26
3.2. Основные требования к средствам индивидуальной противогазотепловой защиты и их схемные решения.....	31
3.3. Математическая модель процесса тепломассопереноса в системе «окружающая среда – газотеплозащитный костюм – человек – физическая нагрузка».....	57
3.3.1. Исследование процесса тепломассопереноса в газо- и теплозащитной оболочках костюмов.....	57
3.3.2. Моделирование динамики таяния льда в охлаждающем элементе ОЭ-2.....	63
3.3.3. Моделирование динамики температуры в подкостюмном пространстве.....	70
3.3.4. Исследование гидродинамических и тепловых процессов в системах охлаждения одежды.....	73
3.3.5. Моделирование динамики температуры в системах местного охлаждения одежды после предыдущего замораживания циркулирующей в них воды.....	81
3.3.6. Исследование процесса теплообмена в противотепловой куртке.....	86
3.3.7. Теплообменные процессы в системе «окружающая среда – охлаждающий жилет – человек».....	87
3.3.8. Энергетические нагрузки горноспасателей при ведении аварийно-спасательных работ.....	94
<b>4. МЕТОД ПОДГОТОВКИ ГОРНОСПАСАТЕЛЕЙ К ЭРГОТЕРМИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ В ИЗОЛИРУЮЩЕМ КОСТЮМЕ.....</b>	<b>104</b>
4.1. Теоретические предпосылки создания метода.....	104
4.2. Определение тепловой устойчивости кандидатов в горноспасатели при профессиональном отборе, стажеров и горноспасателей после тренировок.....	108
4.3. Компьютерная информационно-обучающая программа.....	116
<b>5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ОДЕЖДЫ.....</b>	<b>120</b>

5.1. Методика проведения исследований.....	120
5.2. Результаты исследований.....	130
<b>6. ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ЧЛЕНОВ ПОЖАРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ.....</b>	<b>141</b>
6.1. Эрготермические нагрузки пожарных при ведении аварийно- спасательных работ.....	141
6.2. Существующие способы и средства индивидуальной противогазотепловой защиты аварийно-спасательных подразделений	146
6.3. Математическая модель нестационарного процесса переноса теплоты в изолирующей одежде с системой охлаждения и без нее.....	151
6.4. Тепловой баланс организма пожарного при работе в неизолирующей одежде.....	160
6.5. Экспериментальные исследования энергозатрат и теплового состояния организма пожарных в защитной одежде.....	163
6.5.1. Методика проведения исследований.....	163
6.5.2. Определение энергозатрат и тяжести работ пожарных.....	167
6.5.3. Исследование динамики температуры под изолирующей одеждой пожарных и определение длительности в ней работы.....	173
6.5.4 Адекватность результатов расчета теплового баланса организма пожарного в неизолирующей защитной одежде.....	174
<b>7. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОТИВОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ГОРНОСПАСАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЖАТОГО ВОЗДУХА.....</b>	<b>179</b>
7.1 Существующие методы и технические средства обеспечения работы горноспасателей в противогазотепловой одежде.....	179
7.2 Методы получения холода и схемы холодильных установок.....	182
7.3. Обоснование выбора хладоносителя и разработка технологических схем средств для замораживания водяных охлаждающих элементов.....	188
7.4. Теоретические исследования теплообменных и гидравлических процессов в системе «источник хладоносителя – средства экстренного получения холода–водоледяные охлаждающие элементы».....	204
7.4.1. Теплообменные процессы в установке с использованием турбохолодильников.....	204
7.4.2. Определение толщины и материала теплоизолирующего слоя холодильной камеры.....	212
7.4.3. Моделирование процесса замораживания водоледяных охлаждающих элементов в камерах воздушных установок.....	216
7.4.4 Определение параметров вихревых труб переносной шахтной морозильной установки.....	224
7.4.5. Температурный режим и гидравлические параметры пневмотрубопроводов установок.....	227

7.5. Экспериментальные исследования теплообменных и гидравлических процессов в установках в лабораторных условиях.....	233
7.5.1 Методика проведения исследований.....	233
7.5.2. Исследование теплообменных, гидравлических процессов в морозильных установках и определение адекватности результатов теоретических исследований.....	241
7.5.3. Производственные испытания воздушно-морозильных установок.....	253
<b>8. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ.....</b>	<b>261</b>
8.1. Актуальность задачи и постановка ее решения.....	261
8.2. Теоретические исследования механических и теплообменных процессов в охлаждающих элементах.....	271
8.2.1. Исследование напряженно-деформированного состояния оболочки водолеяного охлаждающего элемента.....	271
8.2.2. Математическая модель нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – переносной (передвижной) теплоизолирующий контейнер – водолеяные ОЭ».....	286
8.2.3 Исследование эндотермических процессов водно–солевых растворов в охлаждающем пакете, определение их состава и массы...	317
8.3. Экспериментальные исследования по определению параметров охлаждающих элементов и теплоизолирующих контейнеров.....	327
8.3.1. Общие сведения.....	327
8.3.2. Методика проведения и исследование напряженно-деформированного состояния оболочки водолеяного ОЭ.....	327
8.3.3. Методика проведения и исследование динамики температуры водолеяных ОЭ в теплоизолирующих контейнерах, определение времени их хранения.....	333
8.3.4. Исследование динамики температуры водно-солевых растворов, определение их состава и массы.....	340
8.3.5. Исследование по определению параметров охлаждающего пакета и определение времени восстановления теплового состояния пострадавших при перегревании.....	350
<b>9. СОЗДАНИЕ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ.....</b>	<b>355</b>
9.1 Конструктивные решения и технические характеристики противогазотепловой одежды.....	355
9.2. Конструктивные решения, технические характеристики средств для противогазотепловой одежды и охлаждающего пакета .....	366
Список литературы	381

Научное издание

**Авторский коллектив**

БУЛГАКОВ Юрий Федорович	доктор технических наук
БОРЩЕВСКИЙ Сергей Васильевич	доктор технических наук
МАРИЙЧУК Иван Филиппович	кандидат технических наук
КОЛОСНИЧЕНКО Марина Викторовна	доктор технических наук
КУРБАЦКИЙ Евгений Васильевич	кандидат технических наук
ВЫГОВСКАЯ Даниэла Даниловна	кандидат технических наук

**ИНДИВИДУАЛЬНАЯ  
ПРОТИВОГАЗОТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА**

М О Н О Г Р А Ф И Я

Под общей реакцией Булгакова Ю.Ф. и Марийчука И.Ф.