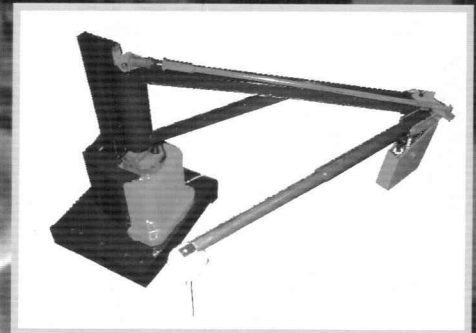
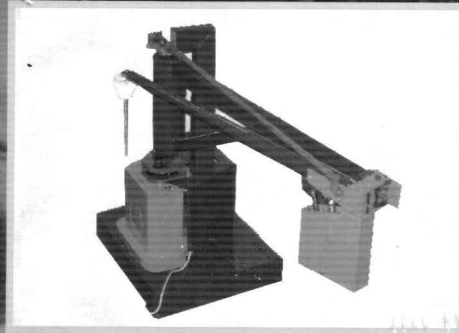


# МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

№ 4(18)

Декабрь 2009



**Проектирование. Исследование. Производство**

**Манипулятор, обеспечивающий ввод в конвертер  
элементов поплавоквого типа  
для отсечки конечного шлака  
при выпуске стали в разливочный ковш**

**Донецкий национальный технический университет  
Кафедра "Механическое оборудование заводов черной металлургии"  
Телефон: +38 (062) 301-08-39. Эл. почта: [ersp@meta.ua](mailto:ersp@meta.ua), [bedas@ukr.net](mailto:bedas@ukr.net)**

# МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

№ 4(18)  
ДЕКАБРЬ 2009

международный научно-технический и производственный журнал

Главный редактор  
В.Я. Седуш, д.т.н.

**Редакционный совет:**

С.И. Авакумов, к.т.н.  
В.Г. Артюх, к.т.н.  
Е.А. Башков, д.т.н.  
Ю.Н. Белобров, к.т.н.  
В.И. Большаков, д.т.н.  
В.С. Волошин, д.т.н.  
В.И. Дворников, д.т.н.  
С.П. Еронько, д.т.н.  
А.А. Ищенко, д.т.н.  
И.А. Ленцов, к.т.н.  
А.А. Минаев, д.т.н.  
С.С. Самотугин, д.т.н.  
В.А. Сидоров, к.т.н.  
А.Н. Смирнов, д.т.н.  
В.В. Суглобов, д.т.н.  
А.А. Троянский, д.т.н.  
В.И. Фарберов, к.э.н.  
Ф.Л. Шевченко, д.т.н.  
С.Л. Ярошевский, д.т.н.

**Редакторы:**

А.Л. Сотников, А.В. Рябухин (рубрика  
"Технологические предложения")

**Учредитель и издатель:**

ООО "Технопарк ДонГТУ "УНИТЕХ"  
83001, Украина, Донецк,  
ул. Артема, 58  
Телефоны: +38 (062) 348-50-56,  
+38 (066) 029-44-30  
Эл. почта: m-lab@ukr.net  
Интернет: assom.donntu.edu.ua

**Представительство в России:**

ООО "ТоИР Консалт"  
121108, Россия, Москва,  
ул. Кастанаевская, д. 27, корп. 4  
Телефон/факс: +7 (495) 775-85-02  
Эл. почта: info@toir-consult.ru  
Интернет: www.toir-consult.ru

"Металлургические процессы  
и оборудование"  
2009. №4(18)

ISSN 1816-1200

Издается с мая 2005 г.

Периодичность издания: 4 раза в год.

Журнал реферировается  
Всероссийским институтом  
научной и технической информации  
Российской академии наук (ВИНИТИ РАН)

**Подписной индекс в каталогах:**

"Пресса Украины" – 98832  
"Газеты, журналы" (Агентство  
ОАО "Роспечать") – 21897

**Свидетельство**

о государственной регистрации  
КВ 11997-868Р от 21.11.2006

**Свидетельство**

о внесении издателя в  
Государственный реестр  
субъектов издательской деятельности  
ДК 1017 от 21.08.2002

За содержание статей и их  
оригинальность несут ответственность  
авторы. Мнение редакции может  
не совпадать с мнением авторов.  
За содержание рекламных материалов  
ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати 30.12.2009.  
Формат 60×84 1/8. Заказ 1212.  
Тираж 1000 экз. Печать  
ООО "Цифровая типография", 2009.

© А.Л. Сотников, 2005-2009

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВО

**Якобше Р.Я., Нагорная Е.Н., Кучаев А.А., Касьян Г.И.**  
Влияние электромагнитного перемешивания жидкой стали  
в кристаллизаторе МНЛЗ на процессы формирования  
круглых заготовок и их структуру ..... 3

**Смирнов А.Н., Гридин С.В., Белобров Ю.Н.,  
Цупрун А.Ю., Сусь Ю.В., Пильгаев В.М.**  
Математическое моделирование процессов загиба и разгиба  
непрерывнолитой заготовки ..... 8

### ОБОРУДОВАНИЕ

**Сидоров В.А., Нестеров А.Л.**  
Исследование влияния давления воздуха  
в пневмоамортизаторах механизма качания  
на параметры движения кристаллизатора МНЛЗ ..... 14

**Еронько С.П., Ошовская Е.В.,  
Штепан Е.В., Мечик С.В., Бедарев С.А.**  
Опыт и перспективы физического моделирования  
гидродинамики потоков металла  
в ванне промежуточного ковша МНЛЗ ..... 20

**Смирнов А.Н., Антыкуз О.В., Цупрун А.Ю.**  
Достоинства и возможности  
механизма качания кристаллизатора МНЛЗ  
с гидравлическим приводом ..... 33

### ТЕХНИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

**Сидоров В.А., Сотников А.Л., Птуха С.В.**  
Техническое обслуживание и ремонт  
механизма качания кристаллизатора МНЛЗ ..... 39

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ

25. Устройство для обработки наружных поверхностей вращения  
крупногабаритных изделий с незакрепленной осью вращения,  
без демонтажа технологического оборудования ..... 45

26. Технология восстановления поверхностей  
медьсодержащих изделий  
на основе управляемого электрохимического процесса  
путем осаждения или наращивания микрогетерогенного слоя  
определенного состава с заданными свойствами ..... 46

27. Электромагнитный процесс изготовления двухслойной стали ..... 47

Условия публикации технологических предложений ..... 49

### ИНФОРМАЦИЯ

Бланк заказа научно-технической литературы ..... 50

Требования к статьям, направляемым в редакцию ..... 59

Об издании ..... 60

**С.П. Еронько /д.т.н./, Е.В. Ошовская /к.т.н./,  
Е.В. Штепан /к.т.н./, С.В. Мечик, С.А. Бедарев**

*Донецкий национальный технический университет (Донецк, Украина)*

## **ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКОВ МЕТАЛЛА В ВАННЕ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША МНЛЗ**

*У роботі розглянуті методи вивчення на фізичних моделях гідродинамічних процесів, що протікають у ванні проміжного ковша при застосуванні різних способів впливу на розподіл потоків рідкого металу з метою покращення умов його дозованого переливу у кристалізатори МБЛЗ, а також визначені напрямки подальших досліджень в цій галузі.*

*В работе рассмотрены методы изучения на физических моделях гидродинамических процессов, протекающих в ванне промежуточного ковша при применении различных способов влияния на распределение потоков жидкого металла с целью улучшения условий его дозированного перелива в кристаллизаторы МНЛЗ, а также обозначены направления дальнейших исследований в данной области.*

Разработка прогрессивных технологий и нового оборудования, обеспечивающего повышение качества выпускаемой металлопродукции, является приоритетным направлением развития сталеплавильного производства в современных условиях. Уровень показателей качества производимого металла во многом зависит от технологических приемов, выполняемых на заключительном этапе процесса получения литой заготовки, т.е. непрерывной разливки стали [1,2].

Необходимость совершенствования технологии разливки стали требует проведения обширных теоретических и экспериментальных исследований гидродинамических процессов, связанных с перетеканием металла из основного ковша в промежуточный и далее в кристаллизаторы машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Особое внимание при этом уделяют условиям эксплуатации промежуточного ковша, конструктивное исполнение которого существенно влияет на обеспечиваемую стабильность таких технологических параметров, как скорость и температура разливки, в значительной мере определяющих структуру металла и состояние поверхности отливаемых заготовок. В последнее время с целью ослабления действия факторов, негативно влияющих на гидродинамическую обстановку в ванне промежуточных ковшей многоручьевых МНЛЗ, активизированы работы, связанные с поиском эффективных технических решений, позволяющих активно воздействовать на характер распределения потоков жидкой стали во время

ее движения из приемной зоны к местам расположения стаканов-дозаторов [3...5].

Достаточно действенным средством, облегчающим решение ряда сложных задач, связанных с внедрением в практику металлургического производства передовой технологии непрерывной разливки стали, является физическое моделирование, позволяющее существенно снизить трудовые, временные и материальные затраты при проведении исследований [6]. Сведения о новых методиках моделирования, предполагающих использование всевозможных новшеств, обеспечивающих высокую достоверность получаемых данных, разрознены в части системного выбора критериев подобия, масштабов моделей, рабочих жидкостей, а также способов оценки достигнутых результатов. В связи с этим обобщение накопленного опыта физического моделирования в области непрерывной разливки стали будет способствовать целенаправленному поиску новых технических решений, связанных с совершенствованием оборудования высокопроизводительных МНЛЗ [7].

В настоящее время в научных лабораториях ведущих фирм все шире применяют физическое моделирование в комплексе с математическими методами исследований. В этом случае результаты физического моделирования используют либо в качестве исходных предпосылок при разработке прогнозных математических моделей гидродинамики потоков жидкого металла в ванне промежуточных ковшей, либо для выполне-

ния оперативной проверки их адекватности реальной картине исследуемых процессов тепло-массопереноса и внесения во время отладки разработанных расчетных программ корректив в принятые ранее ограничения и допущения [8...10].

Физическое моделирование как метод научных исследований требует наличия соответствующей материально-технической базы, контрольно-измерительных приборов и четких рекомендаций по их применению. Речь идет о лабораторном комплексе, включающем объемные модели промежуточного ковша, изготовленные с учетом основных положений теории подобия; специальные чувствительные и высокоточные приборы, позволяющие контролировать в режиме реального времени и фиксировать главные параметры изучаемых гидродинамических процессов; а также современную вычислительную технику для математической обработки и наглядного представления получаемых результатов.

Модель промежуточного ковша изготавливают из органического стекла (рисунок 1), которое легко поддается механической обработке, не вызывает особых затруднений при сборке объемного изделия и обеспечивает его прозрачность, что особо важно для выполнения визуальных наблюдений и проведения фото- или видеосъемки.

Масштаб модели выбирают из условия гидродинамического подобия при соблюдении равенств для нее и натурального объекта критериев Фруда и гомохронности (одновременности событий):

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot d} \text{ и } Ho = \frac{v \cdot t}{d},$$

где  $v$  – скорость движения жидкой среды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $d$  – характерный линейный размер;  $t$  – время.

Модель в плане может иметь прямоугольную или дельтаобразную форму в зависимости от конструкции моделируемого реального ковша. Она должна быть укомплектована набором переносных продольных и поперечных стенок, позволяющих при необходимости менять контуры и размеры внутренней ее части, а также другими конструктивными элементами и дополнительными устройствами, предназначенными для активного влияния на протекание исследуемых гидродинамических процессов. Подачу с требуемой скоростью в приемную часть модели ковша жидкости, имитирующей расплав, осуще-

ствляют из питающего резервуара, размещенного на высоте от 2 до 3 метров. Необходимо также предусмотреть возможность плавного регулирования с помощью стопорных механизмов расхода истекающей из модели промежуточного ковша жидкости и ее обратную подачу насосом в напорную емкость.

Одной из составных частей подготовки к проведению лабораторного эксперимента является подбор моделирующих сред. Поскольку для любого вещества, находящегося в жидком состоянии, – воды, ртути, металлического расплава и так далее – справедливы законы и теоретические зависимости гидравлики, то при физическом моделировании процесса разлива стали в качестве ее имитатора можно использовать в принципе любую жидкость, за исключением ртути, представляющей собой серьезную опасность для здоровья исследователей.

Плотность и кинематическая вязкость капельных жидкостей, доступных и безвредных

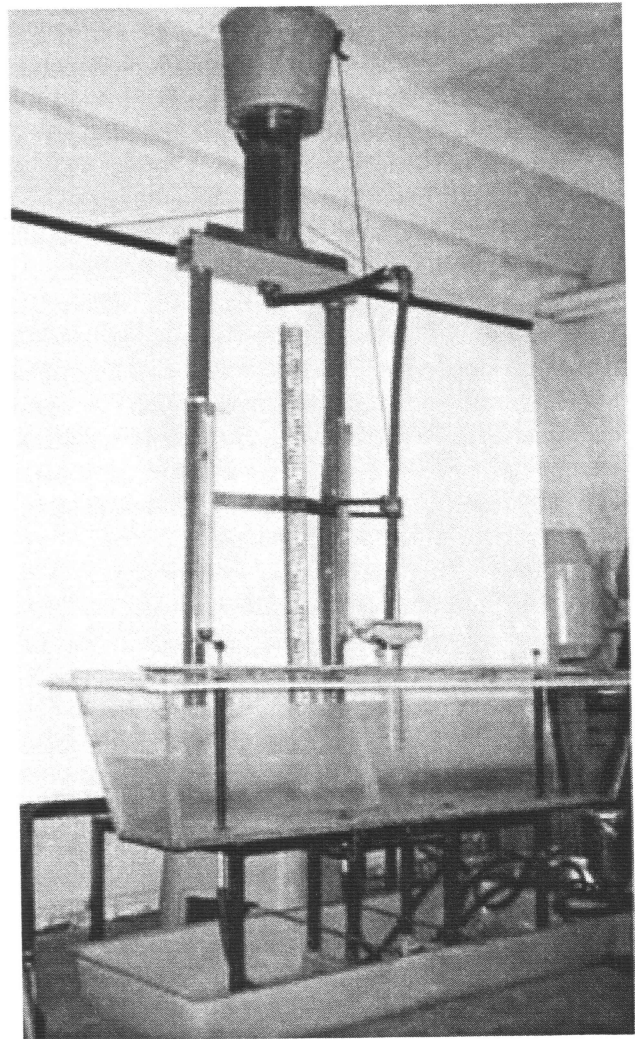


Рисунок 1 – Общий вид лабораторной установки для моделирования процесса непрерывной разлива стали на МНЛЗ

Таблица 1 – Плотность и кинематическая вязкость жидкостей при температуре 20 °С

Жидкость	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Кинематическая вязкость, 10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с
Анилин	945	4,3
Бензин	739...780	0,83...0,93
Вода пресная	998,2	1,01
Глицерин безводный	1250	4,1
Керосин	792...860	2...3
Нефть	760...900	8,1...9,3

для применения в обычных лабораторных условиях, имеют близкие значения (таблица 1), поэтому выбор моделирующей среды зависит в основном от особенностей задач, решаемых при физическом моделировании.

В случае, когда моделируются процессы, протекающие в ковше при наличии стали и технологического шлака, для проведения эксперимента рекомендуется использовать комбинации жидкостей (вода-керосин, глицерин безводный-нефть). При подборе двух моделирующих жидкостей необходимо обеспечить минимально возможное искажение физической сущности исследуемого процесса.

Главными параметрами, характеризующими гидродинамику процессов, протекающих в ванне промежуточных ковшей, считают скорость и турбулентность потоков металла, а также длительность его пребывания в ковше (резидентное время). Поэтому при физическом моделировании этих процессов в первую очередь осуществляют контроль указанных величин. Основные трудности, возникающие при проведении измерений скоростей жидкостных потоков в моделях промежуточных ковшей, обусловлены с одной стороны относительно малыми скоростями движения среды (0,05...0,3 м/с), а с другой – высокой степенью турбулентности, достигающей в характерных зонах жидкой ванны 50 %.

В настоящее время при моделировании используют различные методы измерения скоростей потоков жидкости, основанные на различных физических принципах. Самым простым в техническом обслуживании устройством для измерения скоростей потоков в текущих средах является трубка Пито-Прандтля, имеющая два типа отверстий, открытых для окружающего пространства. Через отверстие, продольная ось которого перпендикулярна направлению движения потока, воспринимается действие статического давления  $P_c$  движущейся среды. Отверстие, выполненное в центре конца трубки, воспринимает полное давление  $P$  жидкости, если трубка расположена параллельно направлению потока. Разность между полным и статическим давлением текущей среды равна ее динамическому давлению  $P_o$  (или скоростному напору). В

соответствии с уравнением Бернулли

$$P_o = P - P_c = \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

где  $\rho$  – плотность движущейся среды.

Отсюда следует, что скорость потока жидкости, являющейся несжимаемой средой, может быть рассчитана по формуле

$$v = \left[ \frac{2 \cdot (P - P_c)}{\rho} \right]^{0.5}.$$

К недостаткам трубки Пито-Прандтля следует отнести низкую чувствительность при малых скоростях потока, а также нелинейность связи между разностью давлений и скоростью.

Внимания исследователей заслуживают устройства, обеспечивающие определение значений локальной скорости жидкости путем измерения количества тепла, рассеиваемого специальным нагревательным элементом при обтекании его потоком среды. Такие устройства, получившие название термоанемометров, широко используются в измерительной технике и выпускаются в различных исполнениях несколькими зарубежными фирмами. В качестве нагревательного элемента в термоанемометре в зависимости от текущей среды, скорость которой контролируют, может использоваться проволока из материала с высоким удельным сопротивлением или тонкая металлическая пленка на подложке. У первого анемометра чувствительный элемент представляет собой вольфрамовую проволоку диаметром 2...5 мкм, закрепленную в двух изолирующих втулках, смонтированных в керамический корпус. Нагревательный элемент второго анемометра выполнен в виде тонкой платиновой пленки, нанесенной на изолирующую подложку путем напыления.

Принцип действия термоанемометра основан на том, что при пропускании электрического тока через его нагревательный элемент последний начинает каждую секунду выделять в окружающую среду количество тепла, определяемое выраже-

нием  $q=I^2R$ , где  $I$  – электрический ток, проходящий через элемент;  $R$  – сопротивление элемента.

Если текучая среда под воздействием каких-либо факторов приходит в движение, то существующее тепловое равновесие между нею и нагревательным элементом нарушится из-за увеличения интенсивности теплосъема за счет его омыwania потоками среды, в результате чего изменится сопротивление проводника, которое можно зафиксировать соответствующим прибором.

Практика использования указанных термоанемометров показала, что проволочный нагревательный элемент благодаря малым размерам имеет низкую инерционность и высокую разрешающую способность, однако в сравнении с тонкопленочным элементом менее прочен и очень часто выходит из строя под механическим воздействием потока.

Общим недостатком всех типов анемометров является невозможность получения с их помощью информации о направлении потоков без применения специальных конструктивных решений. Установка анемометров в трубки приводит к значительному увеличению размеров рабочего элемента измерительной системы и, как следствие, к искажению естественной картины распределения циркуляционных контуров.

Наиболее точным методом измерения пульсаций скорости до недавнего времени считалась скоростная киносъемка. Применение данного метода предполагает ввод в исследуемый объем жидкости специальных веществ или мелких частиц, обеспечивающих ее визуализацию. Указанные материалы должны иметь плотность, равную плотности воды, и обладать высоким коэффициентом отражения, благодаря чему они перемещаются вместе с модельной жидкостью и при выполнении определенных требований достаточно воспроизводят траекторию потоков.

Для фиксации этих частиц при кино- или видеосъемке необходимо обеспечение хорошей освещенности зон перемешиваемой жидкой ванны. Подсветку нужных сечений циркуляционных потоков жидкости осуществляют с помощью, так называемого светового ножа – плоского луча, образующегося при прохождении света мощных ламп через узкую щель в непрозрачном экране, установленном между ними и исследуемой моделью.

Скорость съемки зависит от динамики изучаемых процессов. При скорости потоков до 0,5 м/с рекомендуемая скорость съемки 64...200 кадров в секунду. Если скорость движения жидкости находится в пределах 1,5...2,5 м/с, то ско-

рость съемки должна составлять 600...1000 кадров в секунду [6].

Главным достоинством метода скоростной съемки является возможность дистанционного измерения исследуемого параметра, благодаря чему не вносятся искажения в структуру потоков. Существенный недостаток этого метода – большая трудоемкость считывания информации, требующая покадрового просмотра увеличенных изображений для измерения на них длины и угла наклона траектории движения частиц.

Одним из последних достижений в области развития измерительной техники, используемой для контроля скорости жидкостных потоков при проведении лабораторных экспериментов, следует считать применение для этих целей доплеровских лазерных анемометров, реализующих эффект рассеяния лазерного луча взвешенными частицами движущейся жидкости. Однако, следует отметить, что успешное использование лазерного устройства для одновременного получения информации как о направлении, так и о значениях скоростей циркулирующей в сосуде жидкости, моделирующей расплав, стало возможным лишь после разработки специальных прикладных программ, с помощью которых удалось автоматически получать по ширине раstra в 50 мм большое количество значений (до 500) контролируемой величины, поступающих для дальнейшей обработки в компьютер. В данной измерительной системе задействован однокомпонентный аргоновый лазер мощностью 1,2 кВт, а оптическая частотная информация преобразуется фотомультипликатором в электрический сигнал, которая затем в виде цифрового кода поступает в компьютер. Специальная оптическая система позволяет определять абсолютное значение скорости введенных в жидкость микрочастиц в каждом из трех направлений, после чего путем сложения векторных компонент получить общий вектор скорости частицы, движущейся со скоростью жидкостного потока. Данный бесконтактный способ измерения скоростей потоков жидкости позволяет избежать внесения дополнительных возмущений в наблюдаемую картину циркуляционных потоков, обеспечивает быструю обработку результатов измерений, однако требует использования довольно дорогостоящей аппаратуры и соответствующего программного обеспечения.

Доступным и достаточно эффективным для практического применения при контроле скорости модельной жидкости является измерительный зонд, снабженный тензометрическим преобразователем, включенным в измерительную схему, в состав которой входит усилитель, ана-

лого-цифровой преобразователь (АЦП) и персональный компьютер.

Измерительный зонд (рисунок 2) включает плоский упругий элемент 5 с наклеенными фольговыми тензодатчиками, помещенный в герметичный стеклянный баллон 3, верхняя часть которого жестко соединена с полый штангой 4, служащей для его фиксации в нужном положении во время проведения измерений, а также вывода проводов, соединяющих контакты датчиков с усилителем. Верхний конец упругого элемента защемлен, а нижний соединен с рычагом 1, вставленным в отверстие резинового колпачка 2, надетого на нижнюю часть баллона. На нижнем конце рычага 1 посредством резьбового соединения закреплен диск 6. Достоинством такого зонда является то, что его можно использовать в химически активных, электропроводных или загрязненных средах. Он имеет хорошую частотную характеристику (верхняя граница частотного диапазона 100 Гц). Благодаря тому, что устройство подобного типа является измерителем двунаправленного действия, оно хорошо функционирует вблизи границы изменения направления потоков. Однако его применение требует учета частоты собственных колебаний упругого элемента, поскольку при определенных значениях измеряемой скорости потока могут возникнуть автоколебания всей системы, в результате чего получаемые результаты измерений будут искажены. Между критическими значениями скорости и частотой собственных колебаний существует зависимость  $v=(1,3...1,4)fd$ , где  $f$  – собственная частота упругого элемента;  $d$  – диаметр круглой пластины.

Стрела прогиба упругого элемента, а, следовательно, и значение снимаемого электрического сигнала, возникающего из-за разбалансировки моста сопротивлений, зависит от динамического давления потока движущейся жидкой среды на приемный элемент зонда, которое, в свою очередь, пропорционально квадрату скорости движения модельной жидкости. При использовании в преобразователе фольговых тензодатчиков с сопротивлением 150...170 Ом, чувствительных регистрирующих приборов и обеспечении оптимального соотношения размеров элементов зонда минимальное значение скорости, регистрируемое с его помощью, составляет 0,05 м/с.

Как видно из выполненного анализа известных измерительных систем, для регистрации значений скоростей жидкости при проведении исследований на гидравлических моделях в распоряжении исследователей имеется широкий выбор аппаратуры. При организации экспериментальных работ, связанных с физическим мо-

делированием гидродинамических процессов, средства измерений должны выбираться с учетом характеристик потока, подлежащих контролю. Следует также помнить о том, что ценность информации, получаемой в ходе эксперимента, зависит не столько от возможностей применяемых технических средств, сколько от правильности и обеспечиваемой степени использования этих возможностей.

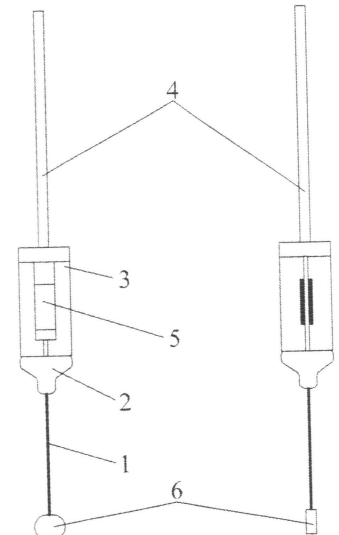


Рисунок 2 – Схема зонда для измерения скорости жидкостных потоков

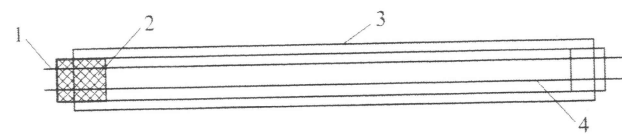


Рисунок 3 – Конструкция шупа для измерения удельной проводимости раствора:  
1 – платиновые электроды; 2 – изолятор;  
3 – державка; 4 – соединительные провода

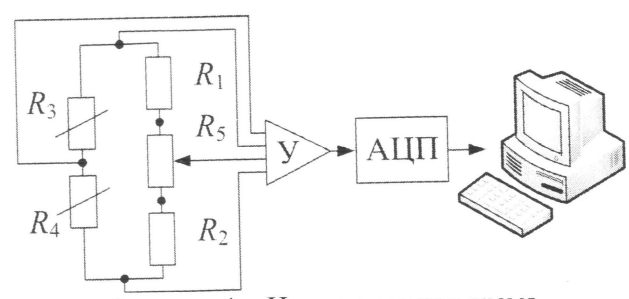


Рисунок 4 – Измерительная схема для контроля времени нахождения солевого раствора в модели промежуточного ковша:

$R_1$  и  $R_2$  – безындукционные сопротивления;  
 $R_3$  и  $R_4$  – шупы для измерения удельной проводимости раствора (см. рисунок 3);  
 $R_5$  – переменное сопротивление для установки нуля;  $Y$  – усилитель;  
АЦП – аналого-цифровой преобразователь

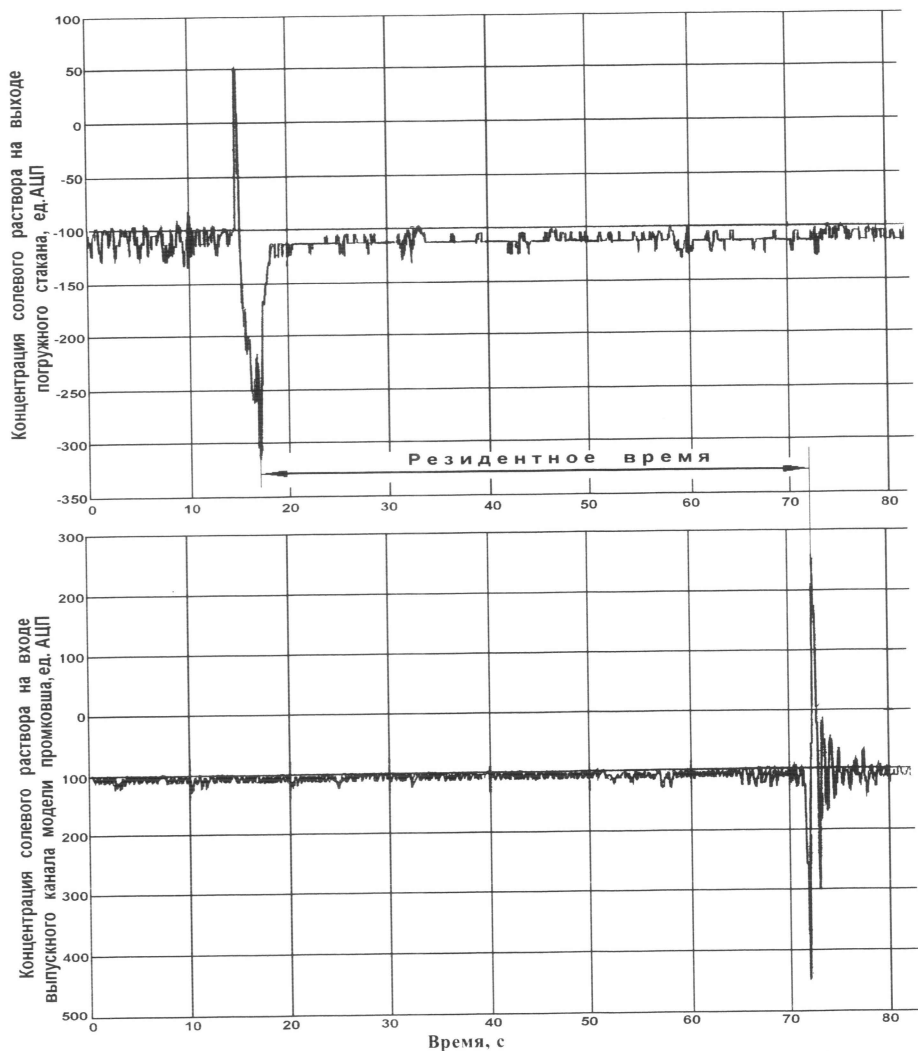


Рисунок 5 – Вид сигнала при регистрации резидентного времени

Для оценки продолжительности пребывания в ванне модели промежуточного ковша жидкости, имитирующей расплав, можно использовать химический метод, позволяющий установить длительность перемещения с жидкостным потоком маркера (небольшого объема насыщенного солевого раствора) между двумя датчиками, один из которых установлен возле выходного отверстия защитной трубы, а второй закреплен вблизи входного отверстия выпускного канала. При этом аналоговый сигнал, пропорциональный разности токов ионизации, протекающих между платиновыми электродами датчиков (рисунок 3), включенных в мостовую схему (рисунок 4), после усиления и преобразования в цифровой код поступает для обработки в персональный компьютер. Временной промежуток между всплесками амплитуд электрического сигнала, зафиксированных вблизи защитной трубы и входного отверстия выпускного канала модели ковша, считают резидентным временем (рисунок 5).

При наблюдении за потоками модельной

жидкости очень важно четко обозначить направление их движения, для чего прибегают к визуализации. Визуализация – это создание условий, способствующих появлению контрастной картины траекторий потоков жидкости за счет введения в нее красящих веществ или мелкодисперсных твердых частиц, имеющих высокий коэффициент отражения. Капли цветной жидкости или же частицы, уносимые оптически прозрачными потоками, в точности воспроизводят их движение и при надлежащей освещенности позволяют получить четкую картину распределения потоков в рабочем объеме моделируемого агрегата. Кроме того, визуализацию относят к одному из необходимых приемов при реализации оптического метода контроля с помощью кино- или видеосъемки времени перемешивания жидкости и скорости ее движения.

К настоящему времени накоплен богатый опыт визуализации линий тока при изучении гидродинамических процессов. Все известные способы выделения потоков прозрачной жидкости на заранее подобранном цветном фоне мож-

но разделить на три группы в зависимости от вида применяемого маркера потока.

К первой группе относятся способы, предполагающие подачу в циркулирующую жидкость специальных красителей, вводимых в жидком состоянии с помощью шприца или с использованием напорной емкости, располагаемой над моделью на высоте не менее 2 м. При использовании интенсивных красителей следует помнить о том, что большинство из них имеют тяжелые молекулы, вследствие чего коэффициенты молекулярной диффузии у таких веществ намного меньше, чем коэффициенты переноса количества движения (кинематической вязкости). В связи с этим в нетурбулентных областях движение облака красителя будет происходить медленнее по сравнению с распространением количества движения.

Способы визуализации жидкостных потоков, составляющие вторую группу, основаны на использовании мелкодисперсных частиц или шариков диаметром до 0,5 мм, материал которых по плотности близок к плотности воды, благодаря чему они обладают нулевой плавучестью и движутся строго в направлении ее потоков. Практические результаты свидетельствуют о том, что для этих целей может использоваться обезжиренная алюминиевая пудра, нафталиновая эмульсия, шарики из полипропилена или воска, деревянные опилки, а также крупинки фуксина.

К третьей группе способов визуализации следует отнести те, в которых в качестве "трасеров" применяют газовые пузырьки, вводимые специальным образом в жидкую среду. В последнее время широкое распространение получил метод водородных пузырьков, основанный на применении электролиза, в результате которого образуется множество мельчайших пузырьков водорода, достаточно четко обозначающих траекторию жидкостных потоков.

Использование указанных выше способов и аппаратных средств контроля наиболее важных параметров гидродинамических процессов позволило при их изучении на физических моделях выполнить проверку новых технических решений в области непрерывной разливки стали и выработать рекомендации по практическому применению предложенных новшеств в конструкциях промежуточных ковшей МНЛЗ, эксплуатируемых в сталеплавильных цехах ряда металлургических предприятий. Речь идет о гасителях вихревых потоков, порогах, перегородках, продувочных балках и оптимальных вариантах их размещения при различной геометрии промежуточных ковшей и в соответствующих

условиях разливки [11...13]. Полученные результаты проведенных исследований легли в основу разработанных мероприятий, направленных на снижение влияния переходных режимов разливки, связанных с изменением характера движения потоков в промежуточном ковше, на эффективность выполняемых в нем операций по рафинированию металла [14,15].

Как свидетельствуют данные последних публикаций отечественных и зарубежных авторов, дальнейшие исследования гидродинамики жидкого металла в промежуточных ковшах на их физических моделях будет связано с изучением влияния на параметры и направленность потоков стали специальных огнеупорных изделий, не относящихся к элементам конструкции самого ковша (распределительные и демпфирующие устройства, защитные трубы).

Модификация донной части промежуточного ковша за счет применения сменного огнеупорного блока, имеющего профилированную рабочую поверхность и прикрепляемого с помощью замкового устройства к днищу промежуточного ковша в месте падения струи металла, обеспечивает направленное движение потока по дугообразным траекториям. В качестве примера на рисунках 6 и 7 показаны соответственно модель распределительного устройства и достигаемые с его помощью направленность и скорость распространения потоков визуализированной жидкости, имитирующей расплав.

При правильно подобранных углах наклона боковых граней распределительного устройства в ванне промежуточного ковша можно обеспечить траектории потоков металла, в наибольшей

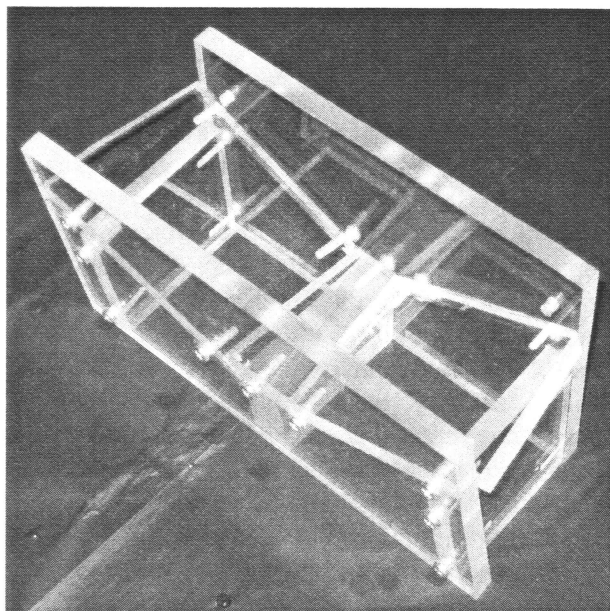
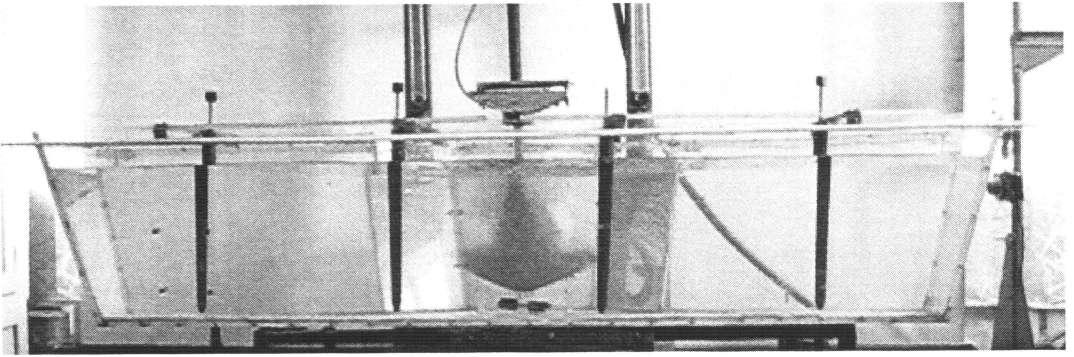
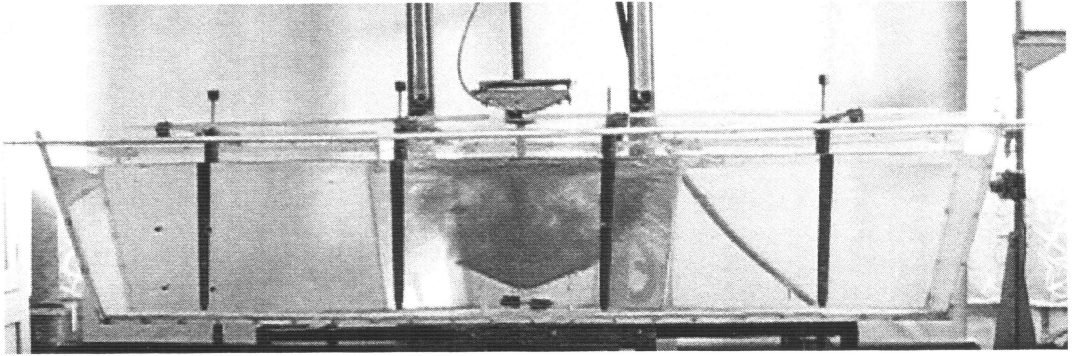


Рисунок 6 – Модель устройства для распределения жидкостных потоков

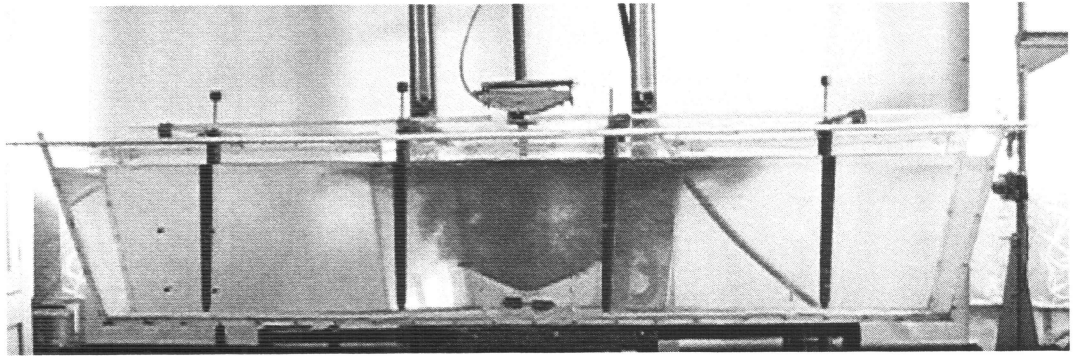
0:00:01



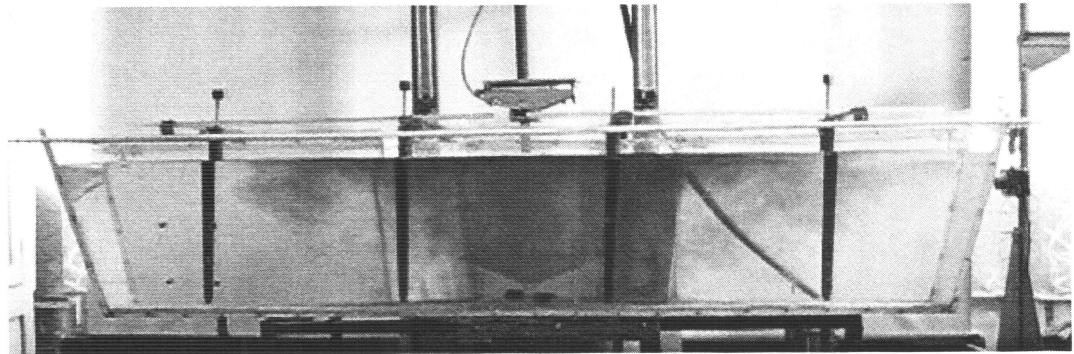
0:00:02



0:00:05



0:00:09



0:00:17

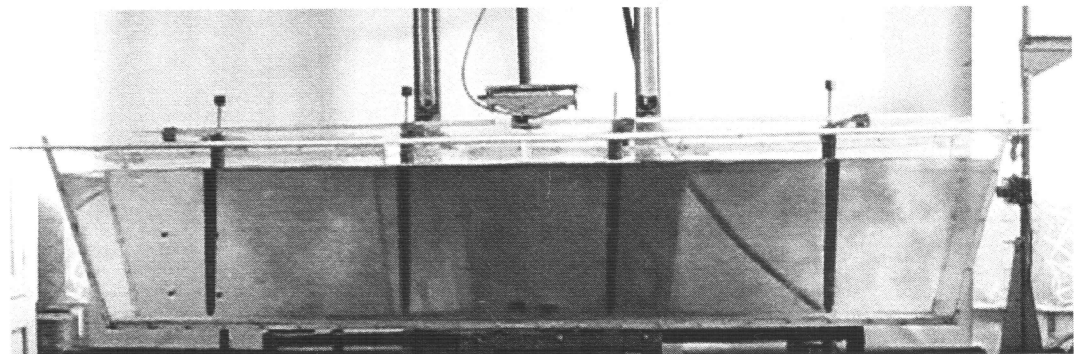


Рисунок 7 – Кинограмма картин развития направленности потоков жидкости при имитации разливки открытой струей при наличии распределительного устройства

мере способствующие развитию процессов удаления неметаллических включений и распределения тепловой энергии в объеме расплава, что в итоге положительно скажется на качестве отливаемых заготовок. Поэтому модельные исследования влияния конструктивных параметров подобных распределительных устройств на эффективность их применения в различных условиях непрерывной разливки стали должно быть продолжено.

В последнее время в технической литературе появились сведения о новом направлении исследований, связанных с применением огнеупорных защитных труб, позволяющих одновременно с экранированием струи металла от окружающей атмосферы влиять на структуру и скоростные параметры жидкостных потоков в ванне промежуточного ковша. Так в работе [3] приведены данные об использовании защитной погружной трубы, отличающейся от широко используемых в настоящее время аналогов тем, что она имеет рабочую полость с обратной конусностью. При таком продольном профиле огнеупорного изделия в ванне промежуточного ковша отсутствуют обратные потоки, что позволяет с меньшим количеством в нем остаточного металла осуществлять замену сталеразливочного ковша в условиях серийной разливки стали.

Аналогичную задачу по оптимизации потока металла, поступающего в промежуточный ковш, в работе [16] предлагается решать с помощью огнеупорного стакана, снабженного завихрителем, после прохождения которого поток металла расширяется под действием центробежных сил, в результате чего резко уменьшается его динамический напор и как следствие снижается интенсивность износа рабочего слоя футеровки и загрязненность разливаемой стали неметаллическими включениями.

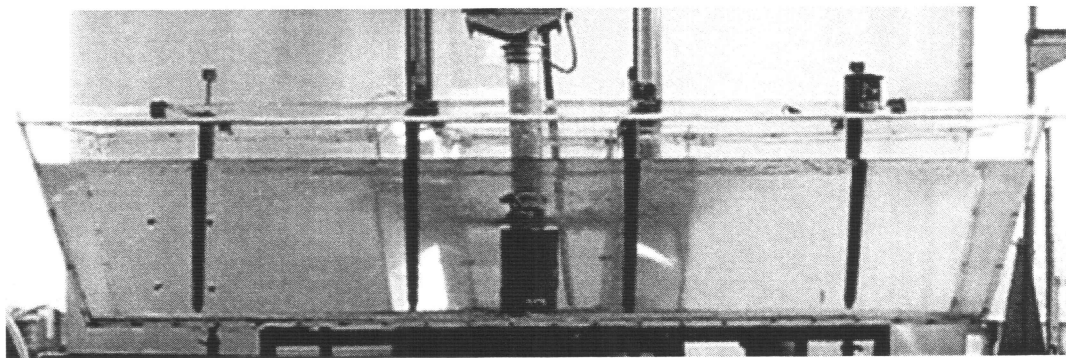
Для проверки перспективности исследований в данном направлении авторами смоделирован процесс распространения потоков металла в промежуточном ковше при использовании модифицированных огнеупорных изделий, подающих жидкую сталь. В качестве альтернативного решения опробовано новое конструктивное исполнение погружной защитной трубы, имеющей глуходонный канал с двумя боковыми выходными отверстиями в нижней части. Для оценки эффективности регулирования жидкостных потоков с помощью такой трубы изготовлено несколько ее моделей, имеющих различную форму и площадь проходного сечения отводящих каналов, а также угол между их осями в горизонтальной плоскости. Сечения отводящих каналов имеют форму круга, квадрата и прямоугольника.

Угол между осями каналов варьировали в пределах  $160...180^\circ$ .

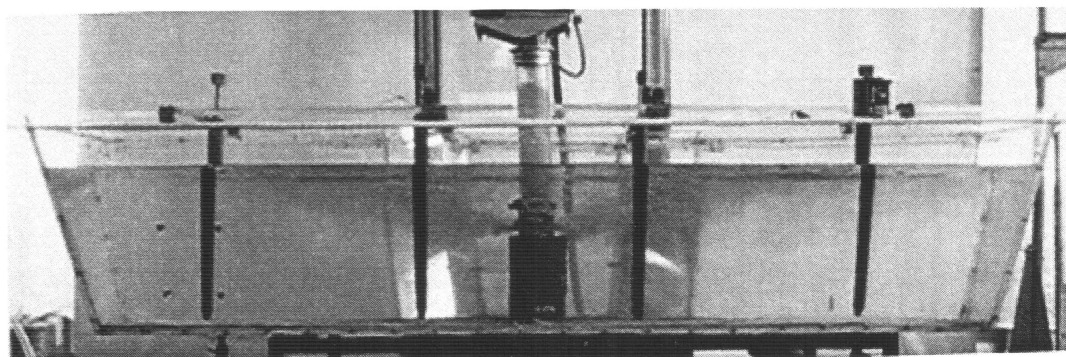
Эксперименты показали, что защитная труба такой конструкции обеспечивает организацию строго направленных жидкостных потоков в ванне промежуточного ковша (рисунок 8). Установлено также, что траекторию потоков можно корректировать, меняя форму и размеры проходного сечения отводящих каналов. Так, при использовании защитной трубы, имеющей круглые отводящие каналы, диаметры которых равнялись диаметру канала стакана-коллектора ковшового затвора, струи жидкости при попадании в модель промежуточного ковша возбуждают два потока, начинающих движение в противоположных направлениях по периметру ванны и встречающихся в средней ее части у передней стенки, образуя циркуляционные контуры, взаимодействующие между собой. В результате такого взаимодействия модельная жидкость из приемной части вначале поступает к дальним ручьям, а затем к ближним, что создает благоприятные условия для температурной стабилизации процесса разливки стали.

Наличие защитной трубы, как известно, не дает полной гарантии предотвращения вторичного окисления стали на участке сталеразливочный ковш-промежуточный ковш, поскольку из-за эжекционного действия струи металла в полости трубы создается разрежение, вызывающее подсос воздуха в зазор между ее чашей и торцом стакана-коллектора затвора сталеразливочного ковша. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что из-за возникающего разрежения жидкость, моделирующая расплав, поднимается в полости защитной трубы над свободной поверхностью жидкой ванны модели промежуточного ковша. Высота подъема модельной жидкости зависит от интенсивности подсоса воздуха через неплотное соединение стакана-коллектора затвора и защитной трубы и насосного эффекта, развиваемого жидкостной струей. Весь воздух, поступающий в полость защитной трубы, увлекается струей жидкости и уносится в ванну на значительную глубину. Затем пузырьки захваченного воздуха всплывают и возбуждают циркуляцию жидкости в вертикальных плоскостях по замкнутому контуру в приемной части модели промежуточного ковша со скоростью  $0,08...0,15$  м/с, оказывая тем самым существенное влияние на характер гидродинамических процессов, протекающих в этой зоне ванны. Эти процессы не только способствуют оголению поверхности металла, но и резко снижают эффективность действия устройства – разделителя потоков.

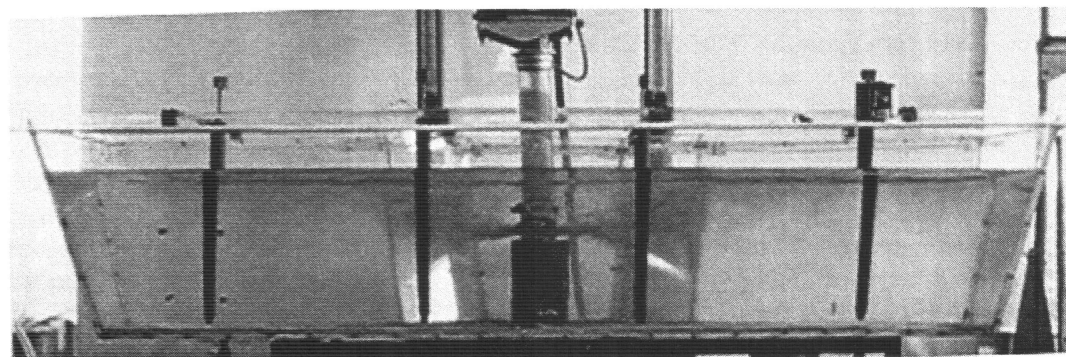
0:00:01



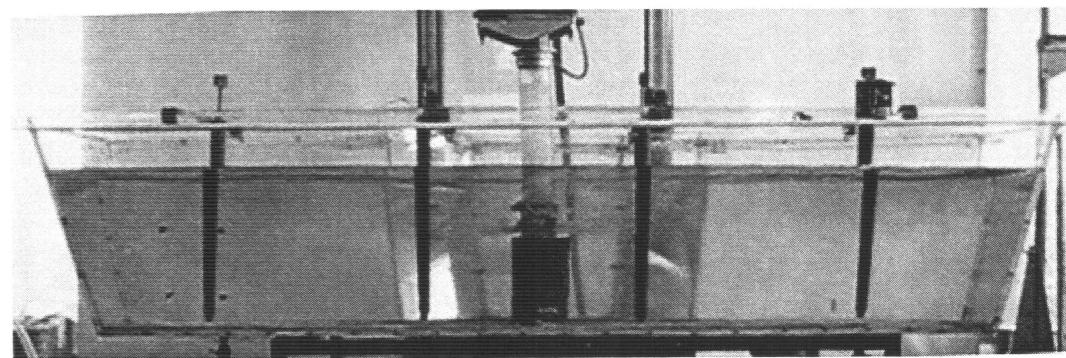
0:00:03



0:00:05



0:00:08



0:00:20

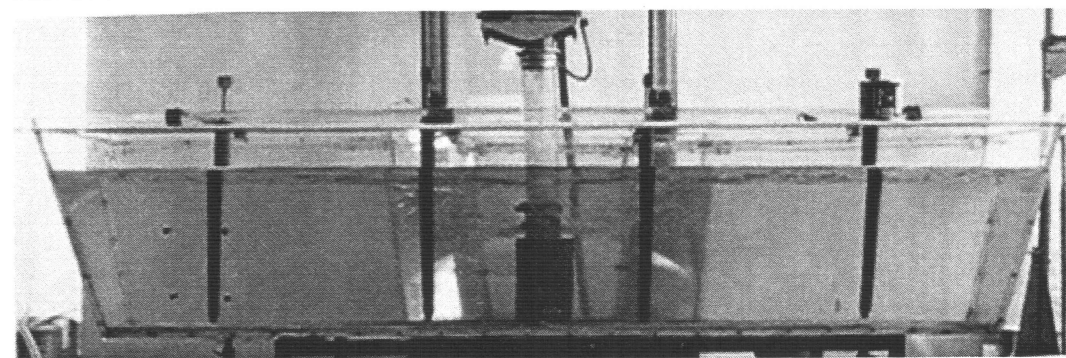


Рисунок 8 – Кинограмма картин развития направленности потоков жидкости при имитации разливки закрытой струей при использовании модифицированной защитной трубы

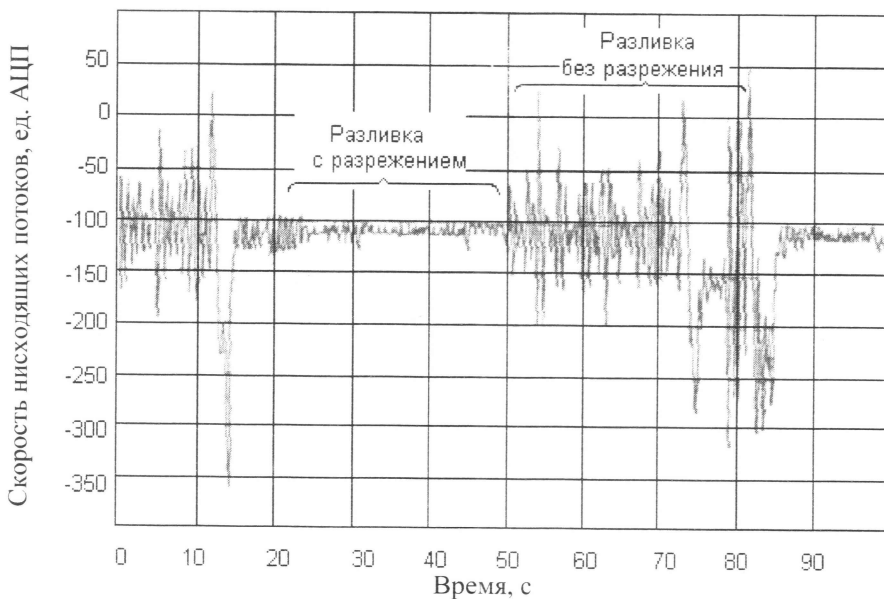


Рисунок 9 – Изменение амплитуды сигнала во время контроля скорости нисходящих потоков жидкости вблизи днища модели промежуточного ковша при различных вариантах разливки

Естественно предположить, что создав условия, препятствующие интенсивному захвату воздуха струей металла в полости защитной трубы, можно повысить эффективность функционирования устройства, регулирующего направленность потоков в приемной части промежуточного ковша. В связи с этим авторами смоделирован вариант разливки с применением эжектора, обеспечивающего регулируемую эвакуацию воздуха из полости защитной трубы [17]. При создании разрежения в полости защитной трубы, как показали результаты измерений скорости потоков модельной жидкости на выходе из ее полости, полученные с помощью зонда, снабженного тензорезисторным преобразователем, амплитуда регистрируемого сигнала, фикси-

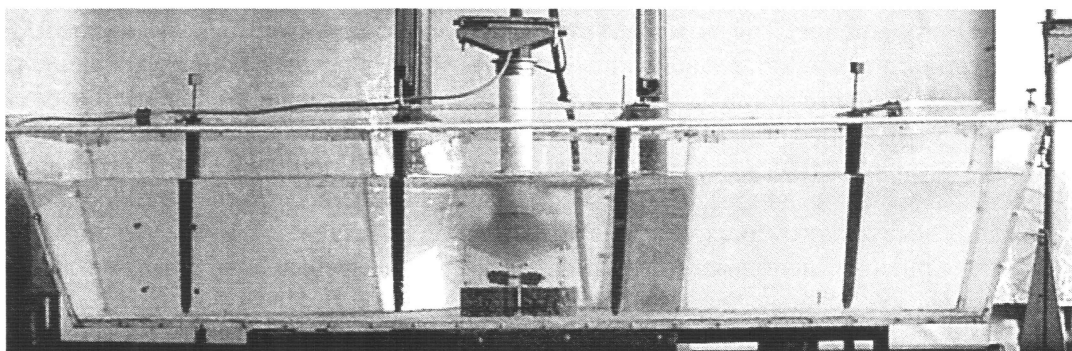
рующего пульсации скорости, снижается в 7...10 раз (рисунок 9). Благодаря эффекту торможения потока жидкости в полости защитной трубы создаются благоприятные условия для всплытия неметаллических включений и снижения насыщения металла газами. На рисунке 10 приведены картины потоков модельной жидкости, на которых отображены траектории движения жидкостных потоков, регулируемых направляющим устройством при различной интенсивности барботирования в зоне, прилегающей к защитной трубе. Эффективность функционирования устройства повышается с уменьшением объема воздуха, попадающего в жидкую ванну.

Результаты контроля резидентного времени (таблица 2) свидетельствуют о том, что ком-

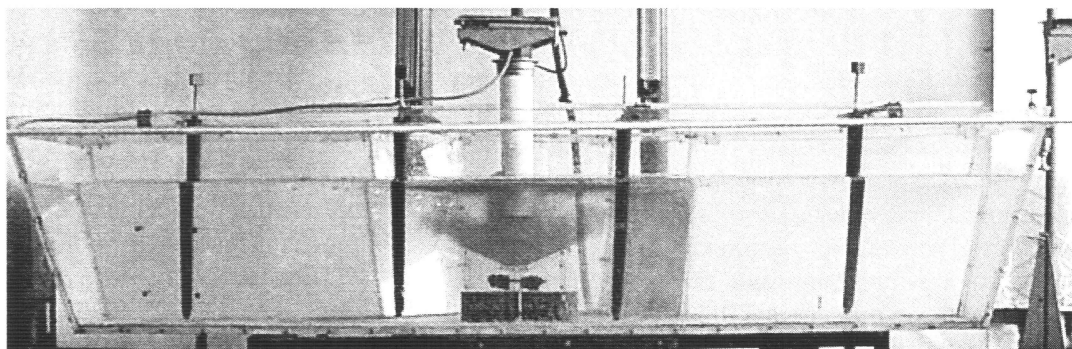
Таблица 2 – Длительность движения жидкости из приемной части модели промежуточного ковша к ее выпускным каналам при различных вариантах организации потоков, с

Вариант реализации процесса разливки	Угол наклона пластин регулирующего устройства, °	Ручей МНЛЗ (выпускной канал)			
		1 (дальний)	2 (ближний)	3 (ближний)	4 (дальний)
Открытой струей при наличии регулирующего устройства	18	33	13	12	35
	23	50	14	14	40
	28	40	15	12	30
Через защитную трубу при наличии регулирующего устройства	18	43	12	12	46
	23	62	23	20	60
	28	53	20	18	50
Через защитную трубу при наличии регулирующего и эжекторного устройства	18	74	60	65	76
	23	75	65	68	80
	28	70	58	55	72
Через защитную трубу с двумя боковыми отверстиями	—	12	15	15	12

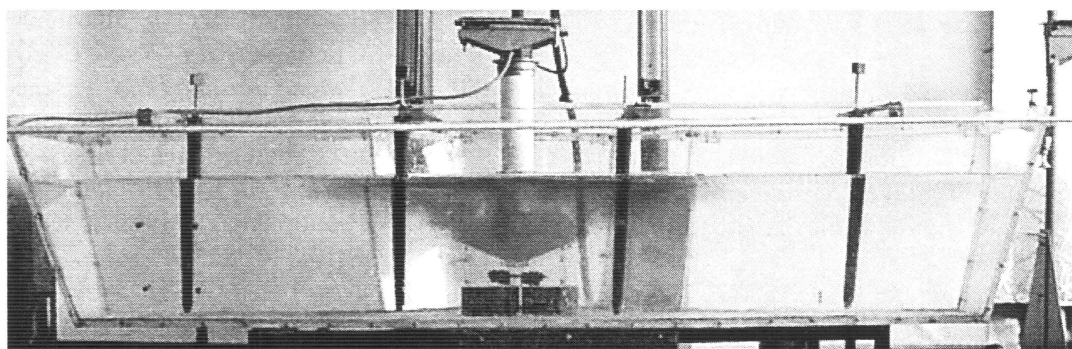
0:00:02



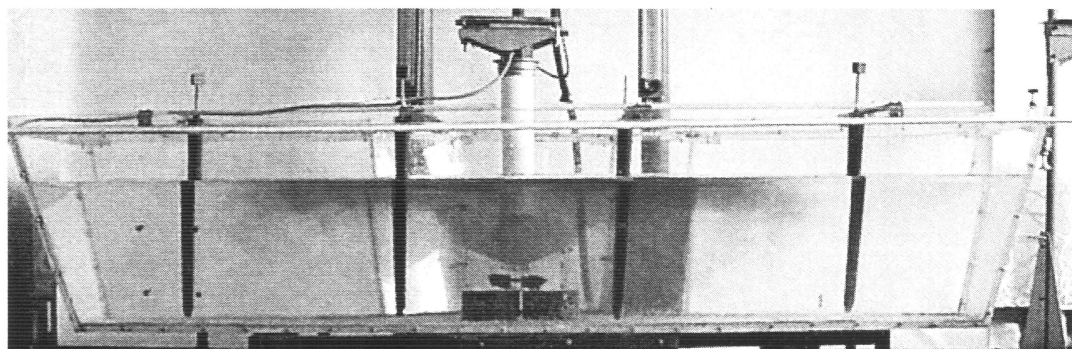
0:00:04



0:00:07



0:00:15



0:00:24

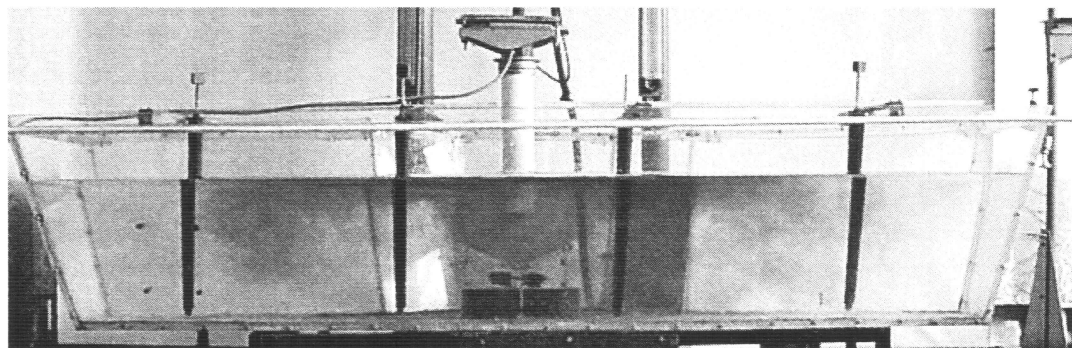


Рисунок 10 – Кинограммы картин развития направленности потоков жидкости при имитации разливки через погружную трубу с использованием распределителя потоков при наличии эжекторного устройства

плексное применение системы регулирования направлений потоков модельной жидкости, защитной трубы и эжекторного устройства, способствует увеличению в 1,2...1,5 раза длительности движения жидкой среды от места ее поступления в ванну модели ковша до места расположения выпускных каналов, т.е. в промышленном варианте использования разработки можно улучшить условия для удаления неметаллических включений.

**Выводы**

Таким образом, физическое моделирование как метод научного исследования по-прежнему будет играть значительную роль при выполнении работ, связанных с поиском решений, направленных на повышение эффективности процесса непрерывной разливки стали в части улучшения гидродинамики потоков расплава в промежуточном ковше МНЛЗ и условий выполнения в нем технологических операций рафинирования металла в поточном режиме.

1. *Процессы непрерывной разливки* / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев и др. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. *Еронько С.П., Быковских С.В.* Разливка стали. Оборудование. Технология. – К.: Техніка, 2003. – 216 с.
3. *Захарьяс Д.Р., Кларк М.Р.* Усовершенствование системы контроля потока в промежуточном ковше / *Сталь*. – 2006. – №5. – С. 72-73.
4. *Разработка оборудования системы распределения потоков стали для промежуточного ковша* / С.Н. Ушаков, А.А. Хоменко, К.Н. Вдовин и др. // *Сталь*. – 2009. – №3. – С. 13-17.
5. *Исследование гидродинамики металла в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ* / Е.В. Протопопов, С.В. Фейлер, Д.Б. Фойгт и др. // Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия" ОАО "Черметинформация". – 2009. – №2. – С. 24-26.
6. *Еронько С.П., Быковских С.В.* Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разливки стали. – К.: Техніка, 1998. – 136 с.

7. *Еронько С.П., Быковских С.В., Ошовская Е.В.* Расчет и конструирование оборудования для внепечной обработки и разливки стали. – К.: Техніка, 2007. – 344 с.
8. *Разработка математической модели и численные расчеты гидродинамических потоков стали в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок* / С.В. Фейлер, Е.В. Протопопов, В.П. Камшутков и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2008. – №12. – С. 15-21.
9. *Хедл Х., Фрауэнхубер К.* VAINOX – последние разработки VAI в технологии непрерывного литья коррозионностойкой стали / *Черные металлы*. – 2001. – №5. – С. 74-79.
10. *Повышение добавочной стоимости за счет системных решений, ориентированных на производственный процесс* / А. Кронхалер, С. Пишек, К. Рам и др. // *Новые огнеупоры*. – 2008. – №3. – С. 109-117.
11. *Ефимов Г.В.* Управление процессом рафинирования стали в промежуточном ковше / *Сталь*. – 2001. – №4. – С. 24-27.
12. *Гидродинамические условия для удаления неметаллических включений в промежуточных ковшах МНЛЗ* / Г.В. Ефимов, В.Г. Ефимова, Е.Ф. Дилюк и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – №10. – С. 56-58.
13. *Тимохин О.А.* Исследование движения металла в промежуточном ковше МНЛЗ // *Черные металлы*. – 2002. – №2. – С. 18-21.
14. *Рафинирование металла в промежуточном ковше* / А.Ф. Сарычев, О.А. Николаев, Т.С. Масальский и др. // *Металлург*. – 2007. – №7. – С. 36-37.
15. *Влияние переходных режимов непрерывной разливки на качество заготовки* / Д.А. Дюдкин, В.В. Белоусов, А.Я. Бабанин и др. // *Сталь*. – 2008. – №9. – С. 20-22.
16. *Swirling Flow Submerged Entry Nozzle for Round Billet Casting* / Y. Tsukaguchi, H. Hayashi, S. Yokoya et al. // *Tetsu-to-Hagane*. – 2007. – №9. – P. 575-582.
17. *Еронько С.П.* Исследование и разработка устройства для непрерывной разливки стали в разреженной атмосфере // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2003. – №5. – С. 20-23.

*Статья поступила 17.11.2009 г.*

*© С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, Е.В. Штепан, С.В. Мечик, С.А. Бедарев, 2009  
Рецензент д.т.н., проф. А.Н. Смирнов*