

УДК 669.18

к.т.н. Куберский С. В.,  
к.т.н. Романчук А. Н.,  
Романчук Я. А.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, waruk007@gmail.com)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАСООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛА ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ

*В работе приведены результаты физического моделирования процесса перемешивания металла со шлаком в ходе продувки аргоном через одно и два продувочных устройства. Установлены зоны, оказывающие влияние на образование неметаллических включений в стали и срок службы сталеразливочного ковша. Получены зависимости площади раскрытия зеркала металла от расхода модельного газа при продувке через один и два продувочных узла.*

**Ключевые слова:** илак, сталь, физическая модель, неметаллические включения, сталеразливочный ковш, агрегат «ковш-печь», окисление, инертный газ.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Динамика перемешивания металла со шлаком в процессе его продувки аргоном представляется крайне важным технологическим этапом, определяющим выбор критериев оптимизации параметров продувки для различных стадий внепечной обработки стали [1].

Важным звеном в технологической цепочке получения качественного металла является обработка его на агрегате «ковш-печь» (АКП).

Одной из основных проблем, возникающих в процессе внепечной обработки стали на АКП, является раскрытие зеркала металла при продувке инертными газами. При раскрытии зеркала металла жидкая сталь вступает в реакцию с кислородом атмосферы, что приводит к образованию оксидов, входящих в ее состав легкоокисляющихся элементов, снижению качества стали вследствие загрязнения неметаллическими включениями, снижению выхода годного металла. Поэтому актуальным является усовершенствование технологии внепечной обработки с целью повышения эффективности удаления из жидкой фазы вредных неметаллических включений. Особенно важно решение этой проблемы для металла, разливаемого на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В этом случае по-

вышенное содержание неметаллических включений не только снижает качество металла, но и может привести к различным аварийным ситуациям вплоть до прорывов.

Источниками кислорода при обработке металла на АКП являются атмосфера рабочего пространства, шлак и футеровка. Вторичное окисление элементов жидкой фазы считается слабо контролируемым процессом [3], что предусматривает поиск эффективных путей снижения интенсивности его развития.

**Постановка задачи.** Изучение характера и интенсивности массообменных процессов, протекающих в сталеразливочном ковше, является важным направлением исследований и способствует разработке эффективных рекомендаций для совершенствования технологии получения качественного металла.

Поэтому основной задачей данного исследования являлось исследование характера перемешивания металла и шлака при различных режимах обработки его на АКП с использованием физического моделирования процесса.

**Объект исследования** — внепечная обработка стали.

**Предмет исследования** — гидродинамика жидкой ванны при продувке расплава аргоном в сталеразливочном ковше.

**Задача настоящих исследований** состояла в изучении процесса перемешивания металла и шлака при продувке расплава через один и два продувочных узла на холодной физической модели.

**Методика исследования.** Процесс моделирования осуществлялся на холодной физической модели сталеразливочного ковша емкостью 300 т, выполненной по геометрическому подобию в масштабе 1:8 к промышленному объекту. Положение продувочных узлов в днище физической модели по радиусу и удалённости от вертикальной оси ковша выбрано в соответствии с их расположением на промышленном объекте. В качестве жидкостей, моделирующих сталь и шлак, применяли, соответственно, воду и машинное масло, имеющие различную вязкость. Для продувки в модели использовали сжатый воздух. В процессе исследований изучали гидродинамику жидкой ванны и газовых потоков при инжектировании газа через одну и две продувочных пробки. Расход продувочного газа на модели может варьироваться от 2 до 28 л/мин, что соответствует расходу аргона на объекте в пределах от 100 до 1400 л/мин. Выбор моторного масла для имитации шлака на поверхности металла объясняется определенной сово-

купностью свойств масла, в т. ч. его диспергированием при контакте с водой. Между моторным маслом и водой обеспечивается низкое межфазное натяжение, что соответствует поведению жидкого шлака на поверхности стали.

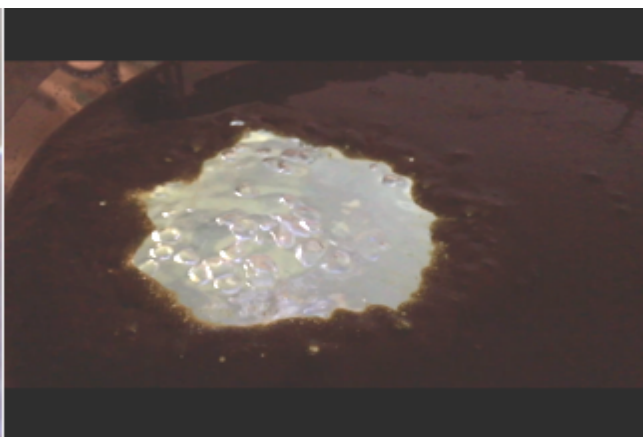
**Изложение материала и его результаты.** В ходе продувки сжатым воздухом в модели образуется газожидкостная струя (рис. 1, а), состоящая из мелких пузырьков преимущественно сферической и вытянутой формы, которые, достигая границы раздела вода – масло, увлекают за собой жидкость и образуют в слое масла небольшой бурун, а часть пузырьков выходит на поверхность (рис. 1, б) образуя оголенное пятно.

При расходе сжатого воздуха менее 1 л/мин оголение зеркала воды практически не происходит. Пузырьки газа, достигая границы раздела фаз металл – шлак, проходят через шлаковый покров, не нарушая его и тем самым не оголяя зеркало металла. Слой масла в месте всплытия пузырьков приподнимается, немного вспениваясь.

Необходимо отметить, что такой режим продувки применяется на металлургических предприятиях только для поддержания продувочных пробок в рабочем состоянии для предотвращения их заметалливания.



а)



б)

Рисунок 1 Характер входа продувочного газа в жидкую ванну (а) и выход его на поверхность (б)

При увеличении расхода продувочного газа до 2 л/мин и дальнейшей продувке количество пузырьков, их размер и образующееся пятно увеличиваются. При таком режиме продувки масляный покров не вовлекается вглубь внутренними газожидкостными потоками перемешиваемой жидкости и остаётся преимущественно целостным, без видимых раскрытий. На рисунке 2, а показано раскрытие зеркала на поверхности воды при расходе сжатого воздуха 2 л/мин. Указанный расход сжатого воздуха на модели соответствует расходу аргона 100 л/мин на промышленном объекте. Такой расход сжатого воздуха через одну продувочную пробку позволил в лабораторных условиях воспроизвести режим «мягкой» продувки стали через одно продувочное устройство и в точности имитировать поведение шлака на поверхности жидкого расплава. В ходе продувки на модели пузырьки больших размеров на поверхности начинают лопаться, образуя более мелкие, а к ним присоединяются пузырьки, вновь доставляемые газожидкостным потоком. Тем самым, количество пузырьков, образующих пятно на поверхности, растёт,

расширяя его размеры. Соответственно, это способствует развитию газлифтного эффекта, что приводит к увеличению доли воды в слое масла (рис. 2, б). На рисунке 2, б показан момент, когда газожидкостная смесь достигает границы раздела фаз вода – масло при расходе воздуха 2 л/мин.

Начиная с расхода сжатого воздуха 5 л/мин, подаваемого через одну пробку, пятно увеличивается в размере и смещается ближе к стенке ковша. Это объясняется тем, что потоки, возникающие вследствие продувки, смещают газожидкостную струю ближе к краю ковша.

При увеличении расхода газа до 7 л/мин, помимо смещения оголённого пятна ближе к краю ковша (рис. 3, а), было замечено смещение части газожидкостного потока ближе к стенке модели, выше середины налива (рис. 3, б). Пузырьки воздуха всплывают, достигая середины высоты налива, и в тот же момент сдвигаются к стенке модели образованными внутри воды потоками. Также важно отметить повышение интенсивности движения газомасляной смеси в зоне выхода пузырьков воздуха.

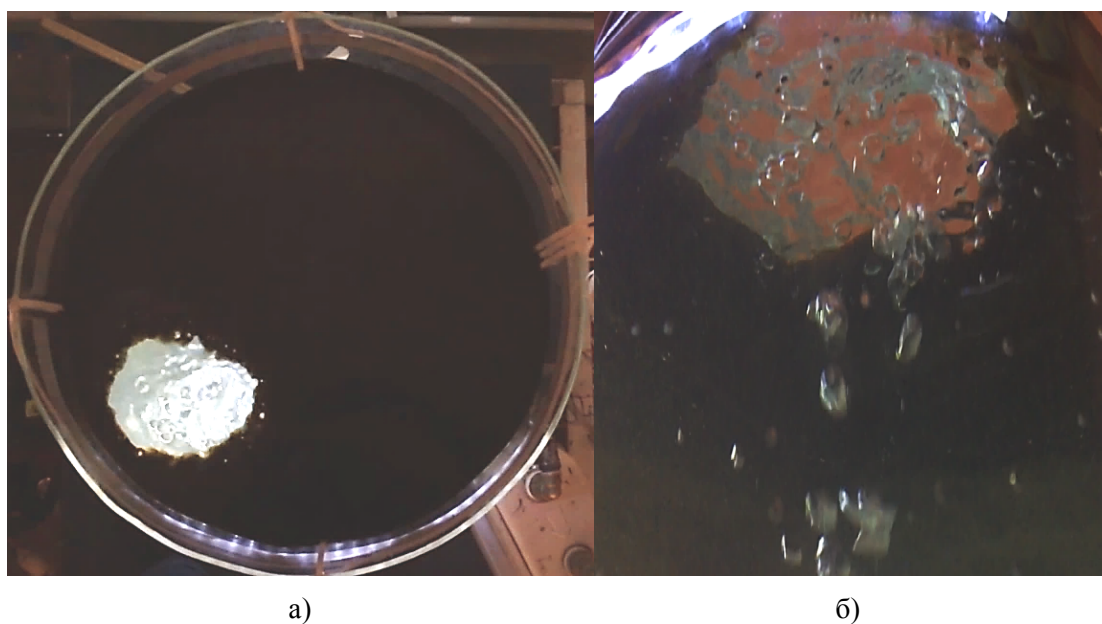


Рисунок 2 Образование продувочного пятна на поверхности (а) и увеличение доли воды в слое масла (б)

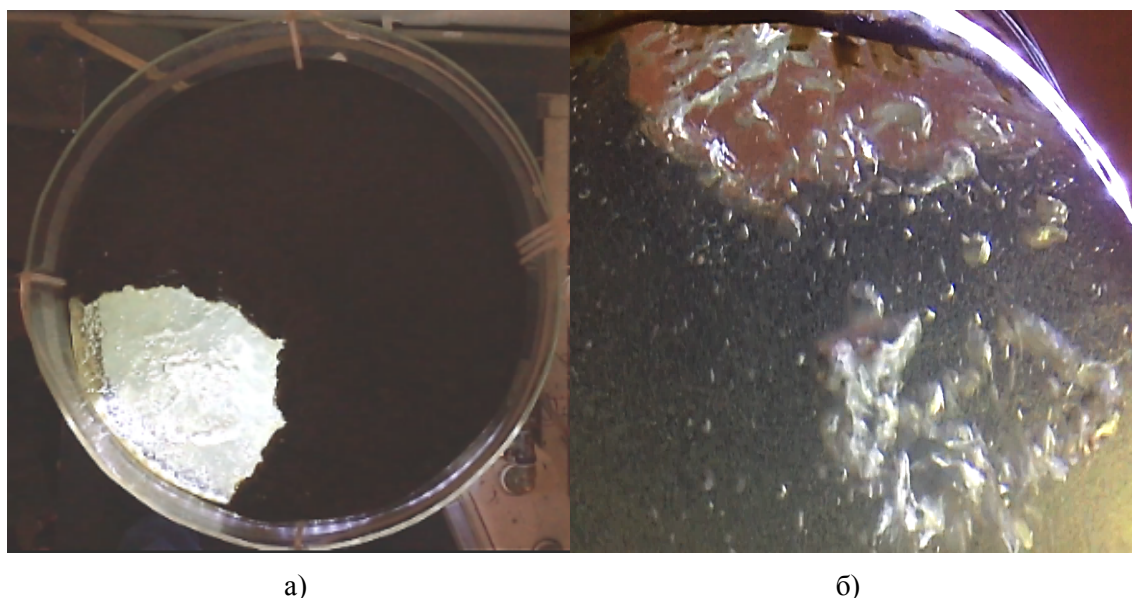


Рисунок 3 Степень оголения зеркала воды при расходе сжатого воздуха 7 л/мин (а) и смещение пузырьков воздуха к стенке модели ковша (б)

Вода с маслом в месте контакта со стенкой ковша совершают колебательные движения (вверх-вниз), что может быть потенциальным местом повышенного износа футеровки на реальном объекте в районе шлакового пояса при продувке через один продувочный узел.

Отмечено, что с увеличением расхода воздуха возрастает скорость всплытия и количество пузырьков. Избыточное количество пузырей, всплывая, вовлекает в траекторию своего движения воду, которая на выходе из жидкой фазы заплёскивается на ближайшую к продувочному устройству стенку ковша, как показано на рисунке 4.

Важно отметить что при продувке через один продувочный узел с расходом воздуха 14 л/мин появился эффект затягивания (вовлечения) мелких частиц масляной фазы, находящейся на поверхности воды, вглубь ее объёма, а остальной масляный покров сдвигался от места выхода газа к противоположному борту ковша.

Диспергированные газожидкостными потоками мелкие масляные образования распространяются по всему объёму модели, циркулируя преимущественно в нижней ее части (рис. 5, а).

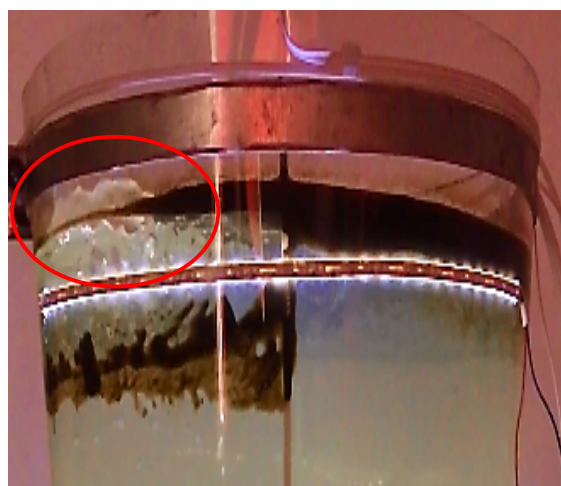


Рисунок 4 Эффект выноса газожидкостным потоком воды на стенку ковша

Более крупные образования так же затягиваются вглубь объёма воды, но в отличие от мелких не опускаются ниже середины ковша, циркулируя в потоке и всплывая в районе оголённого зеркала, как показано на рисунке 5, б.

Установлено, что подача воздуха через один продувочный узел не обеспечивает полного перемешивания объёма жидкости в ковше: процесс перемешивания протекает в объёме ковша ближе к вертикальной



оси продувочного узла. При этом в противоположной от продувочного узла части ковша процесс перемешивания протекает с малой интенсивностью, о чём свидетельствует характер поведения масляных включений в данной зоне ковша.

Путём обработки изображений оголённых областей зеркала воды в редакторе Photoshop были получены данные, которые позволили определить степень раскрытия зеркала воды при продувке через один продувочный узел в процентном соотношении.

На основании полученных данных был построен график зависимости степени раскрытия зеркала воды от расхода воздуха при моделировании продувки через один и

два продувочных узла, а также выведены уравнения регрессии (рис. 6).

Представленные на рисунке 6 данные свидетельствуют о линейной зависимости площади раскрытия зеркала воды от расхода модельного газа.

На втором этапе исследований с использованием физической модели было проанализировано поведение шлака и раскрытие зеркала при продувке металла через два продувочных узла.

По аналогии с предыдущими экспериментами при расходе воздуха менее 1 л/мин оголение зеркала не наблюдалось. Пузырьки газа, достигая границы раздела фаз вода – масло проходили через масляный покров, не оголяя зеркало воды.

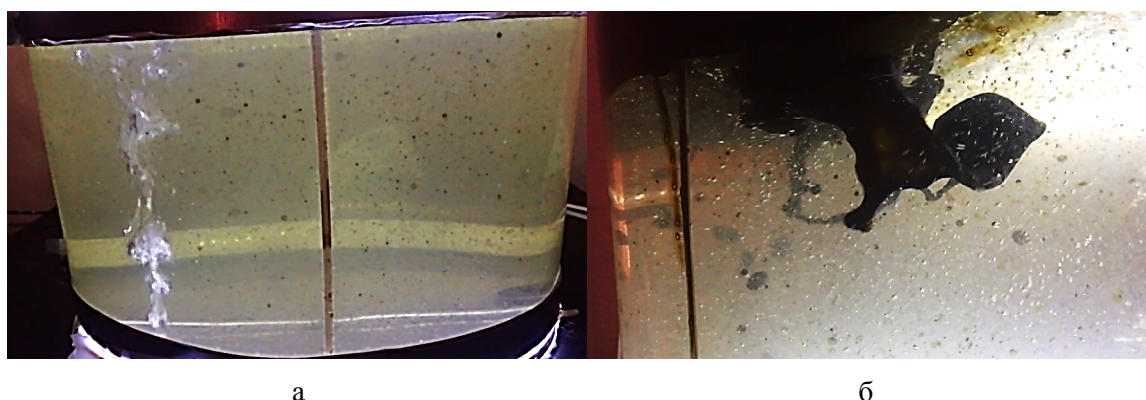


Рисунок 5 Поведение жидкой ванны при расходе продувочного газа 14 л/мин

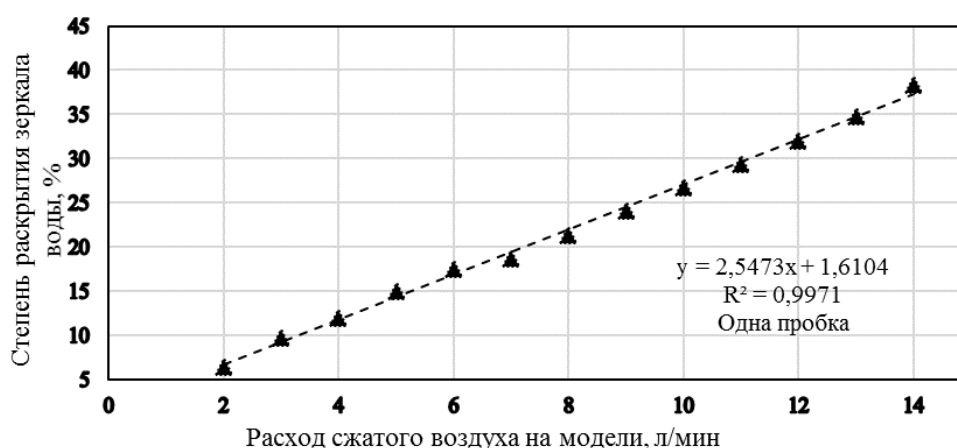


Рисунок 6 Зависимость степени раскрытия зеркала воды от расхода сжатого воздуха на модели при продувке через один продувочный узел

При расходе воздуха 4 л/мин струя газожидкостного потока расширяется, число небольших пузырьков в ней растет, при этом увеличивается и размер буруна жидкости в слое масла. В результате чего образуются пятна, как показано на рисунке 7.

На рисунке 8 показана картина, характерная для достижения газожидкостной смесью границы раздела фаз вода – масло при расходе воздуха 4 л/мин. Также из рисунка видно, что из-за газлифтного эффекта пузырьки воздуха выталкивают воду, и образуется ранее описанный жидкостный бурун на поверхности воды.

При увеличении расхода воздуха до 10 л/мин число пузырьков, достигающих поверхности, увеличивается, и они становятся больших размеров.

Также увеличиваются и размеры пятна оголения воды, как показано на рисунке 9.

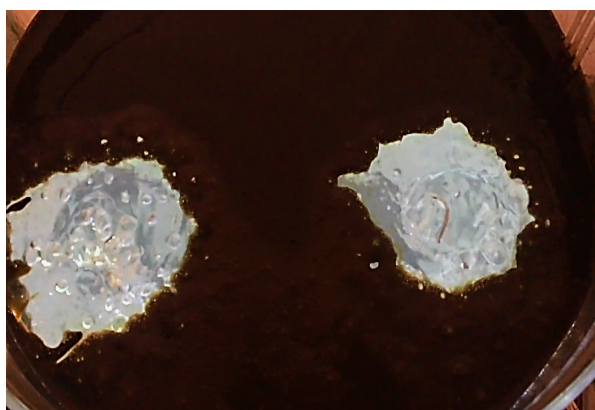


Рисунок 7 Характер оголения поверхности воды при расходе воздуха 4 л/мин



Рисунок 8 Выход газожидкостной смеси на поверхность

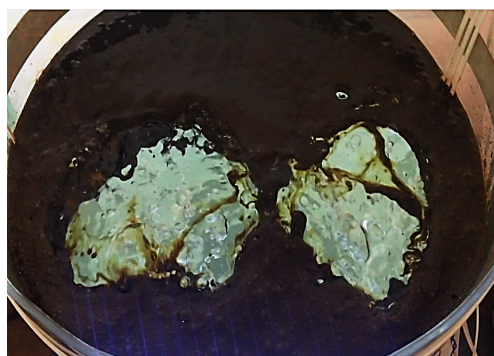


Рисунок 9 Характер оголения поверхности воды при расходе воздуха 10 л/мин

В ходе продувки в слое масла образуются малоскоростные горизонтально направленные потоки, расходящиеся к стенкам модели и увлекающие за собой некоторую часть газовых пузырьков. Также при этом расходе газа появился эффект затягивания порции масла вглубь воды. Часть масла затягивалась вглубь модели, другая же часть сдвигалась к стенке модели. Газожидкостная смесь, достигая фазы вода – масло, дробит масляную фазу на разные по размеру глобулярные масляные образования. Масляные образования затягивались внутренними потоками вглубь воды и распространялись по всему объёму модели, циркулируя преимущественно в средней части модели, как показано на рисунке 10.

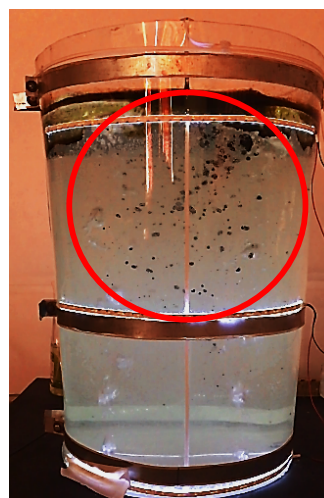


Рисунок 10 Вовлечение порции масла в газожидкостный поток



Важно отметить, что при продувке через 2 продувочных узла затянутае в объем воды масло циркулирует преимущественно в противоположной от продувочных узлов части объема модели.

При увеличении расхода вдвухаега до 15 л/мин описанные выше процессы протекают более интенсивно, а образующийся жидкостный конус (бурун) имеет больший размер. Характерной особенностью при такой интенсивности продувки жидкости газом является её разбрызгивание. Кроме того, при таком расходе воздуха замечен эффект объединения зон выхода газа на поверхность в одно общее пятно, как показано на рисунке 11.

Циркулирующие на границе раздела газожидкостные потоки захватывали порцию масла и увлекали её объем воды ближе к центру основной восходящей струи. При этом от нее могут отделяться более мелкие порции, позже захваченные потоком. В результате в сосуде образуется зона циркуляции, состоящая из смеси воды, пузырьков воздуха и масляных включений разных размеров.

При расходе газа 28 л/мин наблюдалось интенсивное перемешивание жидкости во всем объеме модели, и большая часть масла затягивалась вглубь. На рисунке 12 показано перемешивание воды и масла, а также возникающие циркуляционные потоки.



Рисунок 11 Объединения зон выхода газа в одно общее пятно

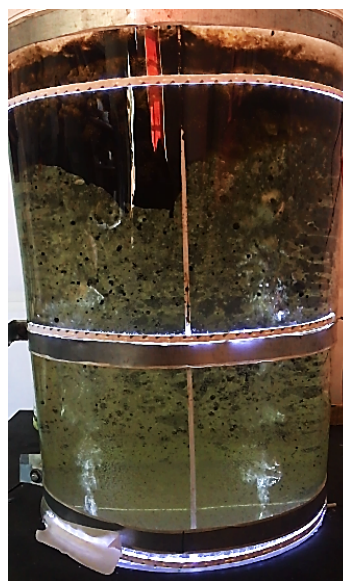


Рисунок 12 Характер перемешивания при расходе газа 28 л/мин

Отрыв капель масла происходит вследствие взаимодействия поверхности масла с восходящими и нисходящими движущимися циркуляционными потоками. Большее количество капель шлака вовлекается в перемешивание, если газожидкостные потоки взаимодействуют между собой. Слой масла, не участвующий в перемешивании сдвигается к стенке модели противоположной от места выхода пузырьков воздуха. Кроме того, при таком перемешивании большая часть зеркала воды остаётся открытой, как показано на рисунке 13.



Рисунок 13 Раскрытие зеркала воды при расходе воздуха 28 л/мин

Путём обработки изображений оголённых областей зеркала воды в редакторе Photoshop были получены данные, которые позволили определить степень раскрытия зеркала воды при продувке через два продувочных узла в процентном соотношении.

На основании полученных данных был построен график зависимости степени раскрытия зеркала воды от расхода воздуха при моделировании продувки через два продувочных узла, а также выведены уравнения регрессии (рис. 14).

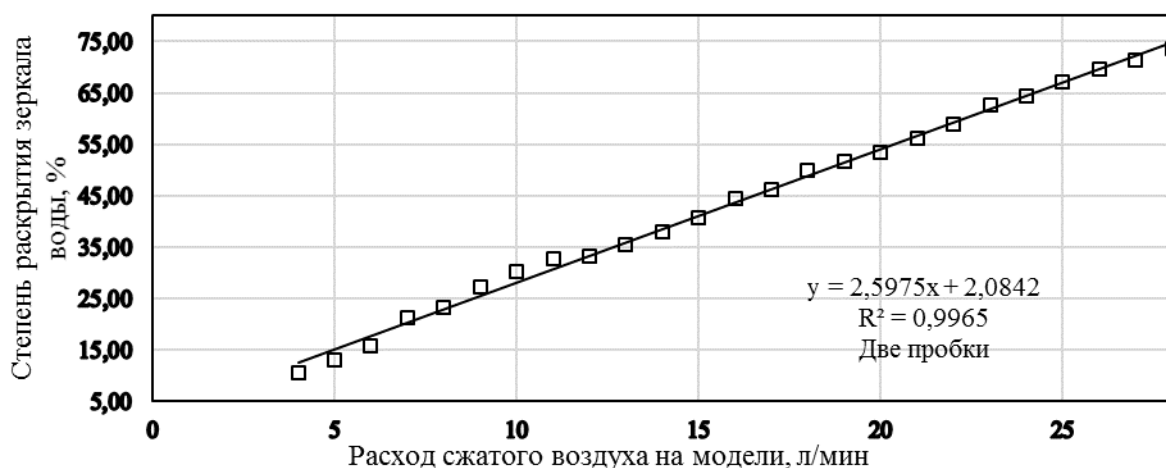


Рисунок 14 Зависимость степени раскрытия зеркала воды от расхода сжатого воздуха на модели при продувке через два продувочных узла

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В ходе исследований, выполненных на холодной физической модели, установлено, что вдувание инертного газа в металл оказывает существенное влияние на поведение шлакового слоя, что находится в прямой взаимосвязи с динамикой вторичного окисления стали и вовлечения шлаковой фазы в металлическую ванну.

Вместе с тем наличие двух продувочных узлов способствует увеличению вероятности захвата частиц шлака металлом и перемещения их вглубь ковша. Это явление обуславливается интенсивным перемешиванием области жидкости, расположенной между продувочными узлами. Кроме того, установлено, что:

- при различных расходах вдуваемого воздуха пузырьки газа проникают в масло

в составе газожидкостной смеси, образуя пятно округлой формы на поверхности масла, причем размеры пятна зависят от расхода вдуваемого воздуха и расположения продувочного узла;

- при интенсивной продувке большая часть шлака может вовлекаться в перемешивание и перемещаться вместе с циркуляционными потоками;

- отрыв капель шлака происходит вследствие взаимодействия поверхности шлака с восходящими и нисходящими движущимися циркуляционными потоками;

- при подаче газа в нижней части ковша, вблизи расположения продувочных узлов образуются вихревые потоки.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку режима пульсирующей подачи инертного газа через донные пробки сталеразливочного ковша.

#### Библиографический список

1. Смирнов, А. Н. *Внепечное рафинирование чугуна и стали [Текст] : учебное пособие / А. Н. Смирнов, А. М. Зборицкик. — Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. — 186 с.*



2. Куберский, С. В. Усовершенствование методики моделирования продувки металла инертными газами в агрегате «ковш-печь» [Текст] / С. В. Куберский, А. Н. Романчук, Я. А. Романчук // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : материалы IV Международной научно-технической конференции. — 2019. — С. 127–130.

© Куберский С. В.

© Романчук А. Н.

© Романчук Я. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТУ Должиковым В. В.,  
зам. нач. ЦЛК Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.*

*Статья поступила в редакцию 01.06.20.*

**PhD in Engineering Kuberskiy S. V., PhD in Engineering Romanchuk A. N., Romanchuk Ya. A.**  
(DonSTU, Alchevsk, LPR, wapuk007@gmail.com)

#### **INVESTIGATION OF MASS EXCHANGING PROCESSES AT METAL TREATMENT WITH INERT GAS IN A STEEL LADLE**

*The paper presents the results of physical modeling of the process of mixing metal with slag during argon blowing through one and two purging devices. The areas that influence the formation of non-metallic inclusions in steel and the service life of a steel ladle are determined. The dependences of bath level opening area on the model gas flow during blowing through one and two purge nodes are obtained.*

**Key words:** slag, steel, physical model, non-metallic inclusions, steel ladle, ladle furnace, oxidation, inert gas.