

УДК 669.18

к.т.н. Куберский С. В.,
Романчук Я. А.,
к.т.н. Саратовский Р. Н.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, waruk007@gmail.com)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА В СТАЛРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ

В работе приведены результаты физического моделирования процесса перемешивания металла в сталеразливочном ковше при его продувке аргоном, подаваемым через два донных продувочных устройства в виде стационарной и пульсирующей струи. Проанализирована динамика и определена площадь раскрытия зеркала воды, а также установлено влияние интенсивности продувки и частоты пульсаций на время усреднения модельной жидкости при стационарной и пульсирующей подаче газа. Показаны преимущества пульсационного перемешивания в сравнении с барботажным.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, сталь, шлак, физическая модель, продувка, инертный газ, барботажное перемешивание, пульсационное перемешивание, стационарная струя, пульсирующая струя, интенсивность, расход, зеркало, усреднение.

В настоящее время достаточно распространенным способом гомогенизации металлического расплава в процессе его внепечной обработки является наиболее простое в реализации барботажное перемешивание посредством вдувания инертных газов (свободный газовый поток). Основными недостатками его являются загрязнение металла шлаковыми и оксидными включениями, потери металла при выбросах, ограниченная интенсивность ввода газа и низкая интенсивность перемешивания металла с вводимыми реагентами (кроме порошкообразных) [1].

Динамика усреднения металла в процессе его продувки аргоном представляется крайне важным технологическим параметром, определяющим выбор критериев оптимизации параметров продувки для различных стадий внепечной обработки. Достаточно очевидно, что интенсивность перемешивания зависит от расхода вдуваемого аргона, а также от количества продувочных узлов. Вместе с тем повышение расхода вдуваемого газа приводит к раскрытию зеркала металла, интенсификации его перемешивания со шлаком и, как следствие, к увеличению интенсивности процессов вторичного окисления [2]. Поэтому

актуальным направлением исследований является изучение новых, альтернативных методов продувки металла инертным газом во время его внепечной обработки.

Одним из относительно новых для металлургии методов продувки может быть продувка пульсирующей затопленной струей (пульсационное перемешивание) [1]. Однако механизм и особенности этого процесса изучены недостаточно и требуется проведение комплекса фундаментальных и прикладных исследований для создания новой эффективной технологии внепечной обработки расплавов посредством инжентирования в них инертных газов.

Наиболее распространенным и эффективным методом исследования процессов, протекающих в объеме жидкого металлического расплава при его продувке инертным газом, является физическое моделирование. Такой подход позволяет визуализировать потоки, образующиеся при гомогенизации расплава, и поведение неметаллических включений.

Поэтому основной задачей представленных исследований было физическое моделирование и сравнительный анализ процессов и параметров, имеющих место

при продувке жидкости газом, подаваемым через донные пробки в виде стационарной и пульсирующей струи.

Процесс моделирования осуществлялся на холодной физической модели сталеразливочного ковша, выполненной по геометрическому подобию в масштабе 1:8 к промышленному объекту емкостью 300 т. 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, а в качестве продувочного газа — сжатый воздух. Подача воздуха к продувочным пробкам осуществлялась от компрессора через газовый счётчик и регулировалась игольчатым вентилем.

Для создания пульсирующей струи в месте расположения донных продувочных узлов были установлены два автомобильных электромагнитных клапана фирмы Atiker. Электромагнитный клапан предназначен для работы в качестве запорного двухпозиционного устройства управления потоком газа. При подаче напряжения 12 В на катушку (соленоид) клапан открывается. Управление электромагнитными клапанами осуществлялось через звуковую карту Lexicon Alpha компьютера. При помощи программы Cubase создавалась аудиозапись (проект) с определенной частотой подачи стереосигнала и передавалась в блок управления электромагнитными клапанами. Стереосигнал разделяется на 2 канала (левый и правый). При подаче звукового сигнала на левый или правый звуковой канал через блок управления открывается первый или второй клапан соответственно. Время, на протяжении которого клапан остаётся открытым, зависит от длительности поступающего не него сигнала, что позволяет подавать газ в виде импульсов различной величины.

Для рациональной организации процесса исследований использована методика

планированного эксперимента с двумя звездными точками, позволяющая разработать оптимальную схему проведения экспериментов, обеспечивающую получение необходимой информации при минимальных временных и материальных затратах. На основании данной методики для исследования параметров, влияющих на время гомогенизации жидкости при продувке пульсирующей струей, была составлена матрица планированного эксперимента. Первым влияющим фактором являлся расход воздуха, а вторым — частота срабатывания электромагнитного клапана.

Использованная на модели система подачи воздуха обеспечивала максимальную частоту в диапазоне 1–360 пульсаций в минуту. Максимальные и минимальные значения частоты пульсаций, определённые с использованием матрицы планирования эксперимента, составили 22 и 348 пульсаций в минуту соответственно.

При выборе расхода газа для моделирования процессов продувки учитывался аналогичный параметр, характерный для действующих промышленных объектов. В частности, при продувке стали аргоном в ковшах емкостью 300 т через две донные пробки расход последнего находится в пределах 0,33–3,67 л/т·мин. Расчёты, проведенные по методике, представленной в работе [3], показали, что с использованием критериев гидродинамического подобия для разработанной физической модели сталеразливочного ковша расход модельного газа должен составлять 2–28 л/мин. Максимальные и минимальные значения расхода воздуха для пульсирующей продувки, определённые с использованием матрицы планирования эксперимента, составили 27,73 л/мин и 2,27 л/мин соответственно.

При проведении исследований параметров, характерных барботажной гомогенизации, с использованием стационарной газовой струи расход воздуха устанавливался с шагом 2 л/мин в диапазоне от 2 л/мин до 28 л/мин.

На первом этапе исследований изучалось раскрытие зеркала воды при стационарном и пульсирующем способе подачи газа.

В ходе продувки в зависимости от её интенсивности поверхность воды может оголяться с образованием «буруна», что приводит к непосредственному контакту жидкости с атмосферой. Размер «буруна» зависит от расхода вдуваемого газа, а также способа его подачи. Процесс формирования «буруна» фиксировался фото-видеокамерой, расположенной сверху, над моделью с помощью штатива. Для определения размеров «буруна» использовался графический метод исследования с помощью системы трехмерного проектирования «Компас-3D». Полученное изображение загружалось в систему трехмерного проектирования. Области изображений, соответствующие машинному маслу и «буруну», обрабатывались встроенным инструментом программы, в результате чего образовывались два замкнутых графических контура, соответствующие данным областям. Для каждого из полученных контуров рассчитывалась занимаемая ими площадь, что позволяло оценить степень раскрытия зеркала воды при стационарной и пульсирующей подаче продувочного газа.

Вторым этапом исследований являлось изучение времени усреднения модельной жидкости по объёму физической модели сталеразливочного ковша. В качестве критерия эффективности перемешивания жидкости в ковше было принято время её гомогенизации по объёму модели. Время гомогенизации определялось как период, требуемый для достижения соответствующей высокой однородности системы, необходимой с технологической точки зрения. Следовательно, время гомогенизации является условной величиной, зависящей от способа определения степени перемешивания, ее численного значения и масштаба наблюдений. Вместе с тем время гомогенизации позволяет произвести сравнительную оценку эффективности ус-

реднения жидкости в ковше при различных режимах продувки.

Одним из эффективных методов определения степени гомогенизации модельной жидкости является электрохимический метод с введением в её объём (воду) определенного количества раствора поваренной соли и одновременным измерением напряжения в различных точках объема модели с помощью специальных датчиков [4].

При осуществлении физического моделирования использовалось восемь датчиков (рис. 1), каждый из которых представлял собой два равноудалённых медных контакта, между которыми пропускался электрический ток.

В качестве электролита, вводимого в воду, применялся насыщенный раствор поваренной соли. Датчики располагались вблизи стенок (4 датчика) и днища ковша (2 датчика), а также в центре физической модели (2 датчика).

Значения, фиксируемые каждым из датчиков, позволяют судить о степени гомогенизации раствора в объеме ковша после введения электролита. Считывающие датчики подключались через блок согласования каналов к аналоговому цифровому преобразователю (АЦП) E-154. В рабочем окне программы LGraph2 отображались линии напряжения на каждом из датчиков. До введения электролита показания на всех датчиках были равны нулю. При достижении электролитом датчика на экране монитора наблюдалось повышение напряжения на нем (до 3–5 В). В процессе продувки, с целью гомогенизации раствора показания напряжения на датчиках постепенно изменяли свои значения. По истечении определенного времени напряжение на всех датчиках стабилизировалось. Стабильное значение напряжения, фиксируемого датчиками (изменение показаний в диапазоне $\pm 0,1-0,2$ В), свидетельствовало об усреднении химического состава жидкости, и процесс продувки прекращали [5].

В таблице 1 представлены результаты исследования массообмена при стационарной и пульсирующей подаче воздуха.

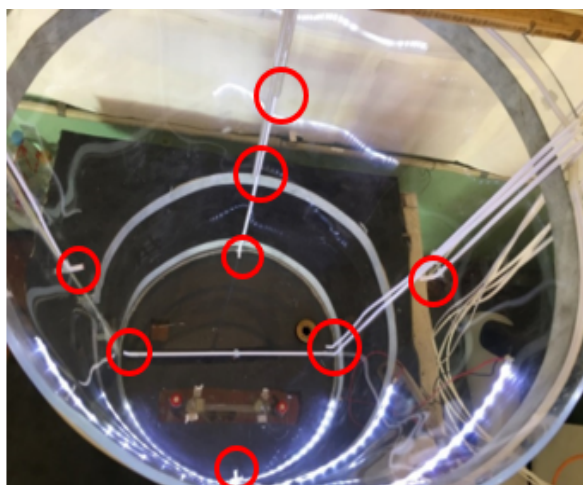


Рисунок 1 Расположение датчиков в физической модели

В ходе исследований, выполненных на холодной физической модели при стационарном режиме подачи воздуха, отмечено, что вдувание инертного газа в металл оказывало существенное влияние на поведе-

ние шлакового слоя. Раскрытие зеркала воды и вовлечение масляной фазы в объем физической модели при стационарной продувке свидетельствуют о прямой взаимосвязи с динамикой вторичного окисления стали и образования неметаллических включений в производственных условиях.

С увеличением расхода воздуха более 10 л/мин наблюдался эффект, при котором одна часть масла захватывалась потоком и втягивалась в объем воды, а другая сдвигалась к стенке модели, оставаясь на поверхности воды. Выходящий из продувочных узлов газожидкостный поток, достигая границы раздела «вода — масло», дробил масляный покров на разные (преимущественно мелкие) по размеру сферические образования. Полученные образования затягивались внутренними потоками вглубь воды, распространялись практически по всему объему, но большая их часть циркулировала преимущественно в средней части модели.

Таблица 1

Результаты исследований, полученные при перемешивании жидкости стационарной и пульсирующей струей

Режим продувки	Расход воздуха, л/мин	Частота пульсаций, ед./мин	Степень раскрытия зеркала воды, %			Время усреднения, с
			за время подачи воздуха	за время паузы в подаче воздуха	средняя	
Стационарный	2,27	–	≤10	–	≤10	135
	6	–	15,72	–	15,72	130
	15	–	40,81	–	40,81	61
	24	–	64,30	–	64,30	20,75
	27,73	–	71,5	–	71,5	15,42
Пульсирующий	2,27	185	17,14	15,41	16,27	112,5
	6	70	32,20	22,60	27,4	82,3
	6	300	27,25	27,03	27,14	74,1
	15	22	67,60	2,00	34,8	54
	15	348	46,12	45,10	45,6	41,4
	15	185	41,22	38,90	40	48
	24	70	51,66	40,90	46,28	41,4
	24	300	54,40	50,53	52,46	32,1
	27,73	185	56,10	53,45	54,77	25,4

При расходе газа 27,73 л/мин наблюдалось интенсивное перемешивание жидкости по всему объёму модели. В этих условиях большая часть масла вовлекалась циркуляционными потоками в перемешивание, оголяя значительную часть зеркала воды. Вследствие взаимодействия масла с восходящими и нисходящими циркуляционными потоками происходил отрыв его капель от моделируемого шлакового покрова и затягивание их в объем воды. Такая картина характерна для поведения шлака и стали при продувке стационарной струей в производственных условиях и объясняет механизм загрязнения металла шлаковыми неметаллическими включениями. Слой масла, который не участвовал в перемешивании, сдвигался к стенке модели, противоположной от места выхода на поверхность пузырьков воздуха («буруна»). Отмечено, что при продувке через два продувочных узла вовлеченное в объем воды масло циркулировало преимущественно в донной части модели, ближе к противоположной от продувочных узлов стенке.

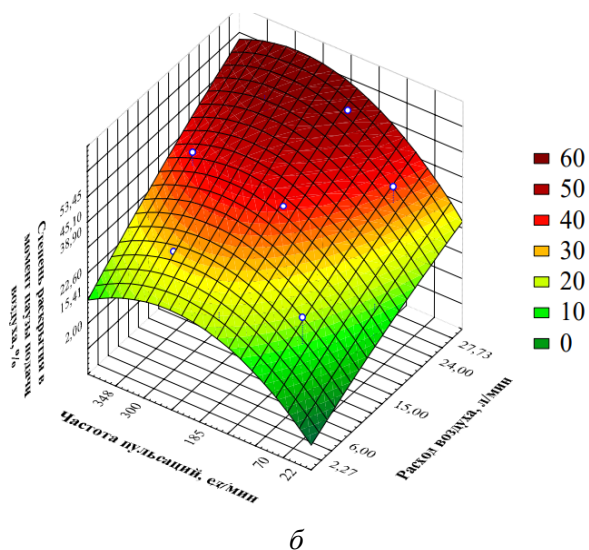
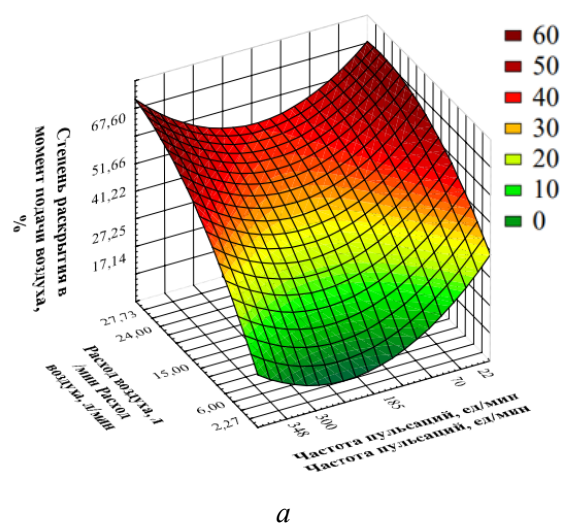
На следующем этапе работы изучалось поведение воды и масла при пульсационном режиме перемешивания.

Обработка экспериментальных данных с использованием программы Statistica позволила определить влияние расхода воздуха и частоты его пульсаций на степень раскрытия зеркала жидкости при её продувке. Полученные зависимости представлены на рисунках 2, а и 2, б и описываются квадратичными уравнениями регрессии (1) и (2).

При барботажном перемешивании образующаяся струя представляет собой непрерывный газожидкостный поток, проходящий через весь объем жидкости по высоте модели от продувочного узла до находящегося на поверхности воды масла. При подаче продувочного газа пульсирующей струей процесс продувки можно разделить на циклы, состоящие из двух основных периодов. Первый период — это время, при котором электромагнитный клапан открыт и в объем жидкости вдува-

ется газ. Второй период имеет место при закрытии электромагнитного клапана, и его длительность определяется временем прекращения подачи продувочного газа.

Наличие таких различных по характеру перемешивания временных отрезков накладывает свое влияние и на площадь раскрытия зеркала металла, величина которой для первого периода описывается уравнением (1), а для второго — соответственно (2).



а — первый период цикла;
б — второй период цикла

Рисунок 2 Зависимость степени раскрытия зеркала воды от расхода воздуха и частоты пульсаций

$$S_1 = 38,4107 + 2,4099x - 0,2444y - 0,0447x^2 + 0,0019xy - 0,0005y^2, \quad (1)$$

$$S_2 = 10,2853 + 1,3496x + 0,2335y - 0,0085x^2 + 0,0013xy + 0,0005y^2, \quad (2)$$

где S_1 и S_2 — площадь раскрытия зеркала за первый и второй период цикла пульсирующей продувки, %; x — расход воздуха при продувке, л/мин; y — частота пульсаций воздуха, ед./мин.

При пульсирующей подаче газа вследствие столкновения газового потока с более плотной жидкостной средой имело место грибообразное его раскрытие в объеме жидкости с последующим дроблением на элементарные объемы различной конфигурации и величины. Кроме того, в нижней части модели, вблизи расположения продувочных узлов, образовывались дополнительные вихревые потоки.

Также отмечено, что при определенных режимах пульсирующей подачи газа в результате раскрытия вдуваемого потока в средней и нижней части объема жидкости образуются потоки, способствующие выносу неметаллических включений к поверхности раздела «вода — масло».

На основании данных таблицы 1 были построены зависимости площади раскры-

тия зеркала воды от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки (рис. 3).

Сравнительный анализ результатов экспериментов, полученных при расходе воздуха в диапазоне 18–28 л/мин для случая стационарной и пульсирующей подачи газа, показал, что при высокой частоте пульсаций (свыше 185 пульсаций в минуту) пульсационное перемешивание обеспечивает меньшую площадь раскрытия зеркала воды в сравнении с барботажным.

Также отмечено, что при использовании пульсирующей струи с расходом воздуха 15 л/мин и низкой частотой пульсаций (22 ед./мин) за время второго периода цикла продувки зеркало воды успевает вновь покрыться маслом. Такой эффект будет способствовать уменьшению времени контакта расплава с атмосферой в реальных производственных условиях, а следовательно, и уменьшению степени вторичного окисления стали.

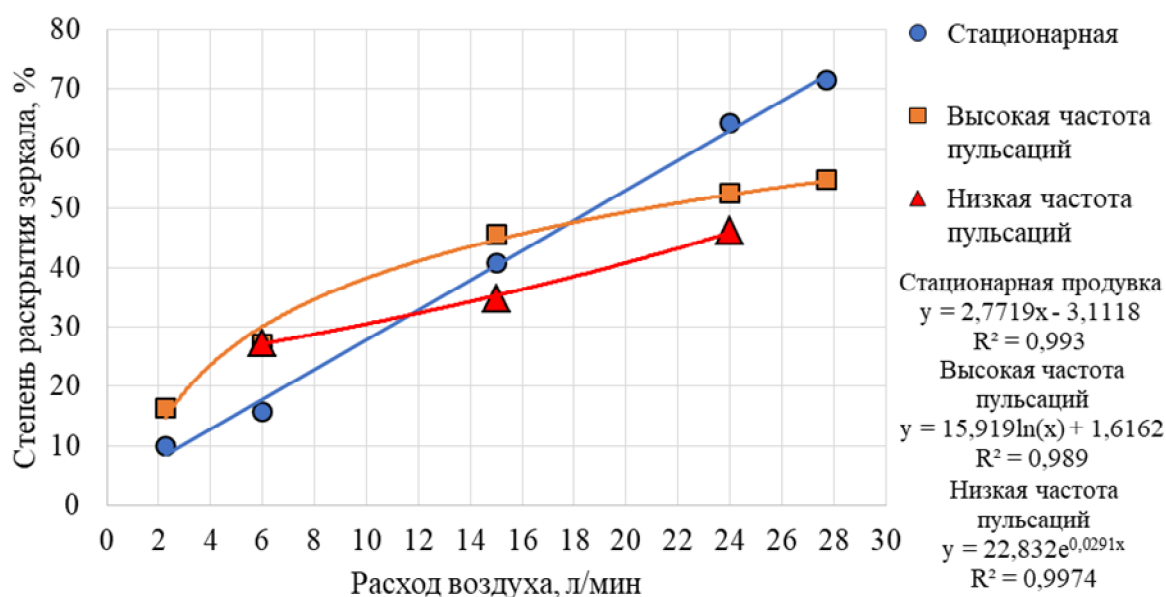


Рисунок 3 Зависимость времени усреднения от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки

При режиме продувки с расходом воздуха 6 л/мин и частотой пульсаций 300 ед./мин наблюдается раскрытие зеркала воды, близкое к раскрытию, имеющему место при стационарной продувке с интенсивностью 11 л/мин, что еще раз подтверждает преимущества предложенного способа продувки по сравнению с базовым с точки зрения расхода продувочного газа и вторичного окисления.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что изменение частоты пульсаций позволяет управлять степенью раскрытия зеркала воды и при одинаковых расходах воздуха для исследуемых способов продувки обеспечить меньшую площадь ее оголения (рис. 3).

Также важно отметить, что варьирование частотой пульсаций может обеспечить

$$\tau = 124,8093 - 6,6113x - 0,0239y + 0,1266x^2 - 0,0003xy - 2,777 \cdot 10^{-5}y^2, \quad (3)$$

где τ — время усреднения воды, с; x — расход воздуха на модели, л/мин; y — частота пульсаций воздуха, ед./мин.

Полученные данные свидетельствуют о том, что использование пульсирующей подачи воздуха в сравнении со стационарной обеспечивает более интенсивное усреднение модельной жидкости после ввода в нее солевого раствора при одинаковых расходах продувочного газа.

На основе полученных в ходе моделирования данных (табл. 1) были построены зависимости времени усреднения от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки (рис. 5). Важно отметить, что полученные в ходе экспериментов данные с датчиков, расположенных в районе днища модели, указывают на более интенсивное перемешивание при пульсирующей продувке в предполагаемых застойных зонах (в нижней части модели ковша).

Из представленных на рисунке 5 графиков видно, что при пульсирующей продувке с высокой частотой (более 185 пульсаций в минуту) в пределах расхода газа 2–22 л/мин усреднение проходит быстрее. С увеличени-

меньшую площадь раскрытия зеркала воды в сравнении с барботажным перемешиванием практически для любого расхода продувочного газа.

По аналогии с исследованиями влияния технологических параметров пульсационного перемешивания на площадь раскрытия зеркала воды была установлена зависимость времени усреднения модельной жидкости по объёму физической модели сталеразливочного ковша от расхода воздуха и частоты его пульсаций.

Полученная зависимость представлена на рисунке 4.

Представленная регрессионная полиномиальная зависимость времени усреднения от частоты подачи и расхода воздуха при пульсирующей продувке описывается степенным уравнением второго порядка

ем расхода газа и частоты пульсаций время усреднения уменьшается. При расходе воздуха 22–28 л/мин для случая пульсирующей струи усреднение протекает несколько медленнее, однако степень раскрытия зеркала воды значительно меньше, чем при стационарной подаче воздуха, что, в свою очередь, является положительным эффектом, способствующим уменьшению интенсивности вторичного окисления стали кислородом атмосферы в производственных условиях.

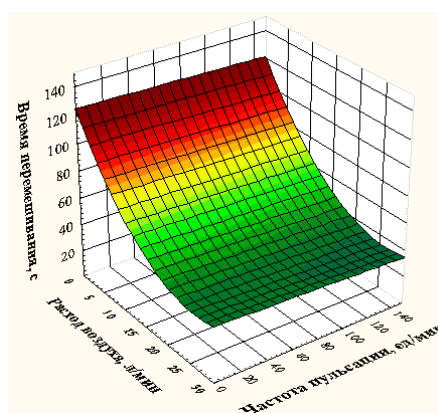


Рисунок 4 Зависимость времени усреднения от частоты подачи и расхода воздуха при пульсирующей продувке

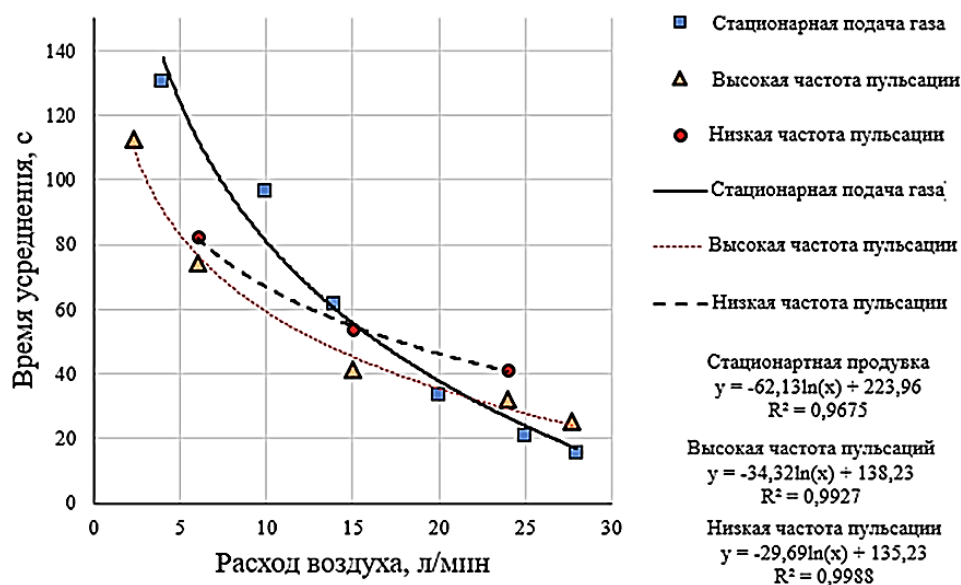


Рисунок 5 Зависимость времени усреднения от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки

В данном диапазоне расхода продувочного газа время усреднения может изменяться варьированием частоты пульсаций.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

– анализ технологических параметров гомогенизации жидкости продувкой ее газом с использованием стационарной и пульсирующей струи показал большую эффективность пульсационного перемешивания в сравнении с барботажным с точки зрения степени оголения зеркала воды, времени ее усреднения и расхода продувочного газа;

– для снижения степени вторичного окисления, времени гомогенизации и расхода продувочного газа можно рекомендовать пульсационное перемешивание для обработки практически любых марок ста-

ли в диапазоне интенсивности продувки 0,33–3,67 л/т·мин, что соответствует интенсивности 2–22 л/мин, имеющей место при физическом моделировании;

– при обработке сталей, имеющих в своем составе высокоактивные по отношению к кислороду и азоту элементы и, следовательно, склонных к вторичному окислению, пульсирующая подача может быть эффективнее и при более высокой интенсивности продувки (на физической модели — более 22 л/мин). Несмотря на некоторое удлинение времени операции площадь контакта зеркала с воздухом в этом случае значительно меньше.

В ходе последующих исследований предполагается проанализировать эффективность пульсационного перемешивания для гомогенизации жидкости по температуре.

Библиографический список

1. Ефименко, С. П. Пульсационное перемешивание металлургических расплавов [Текст] / С. П. Ефименко, В. Л. Пилюшенко, А. Н. Смирнов. — М. : Металлургия, 1989. — 168 с.
2. Смирнов, А. Н. Внепечное рафинирование чугуна и стали [Текст] : учебное пособие / А. Н. Смирнов, А. М. Зборицк. — Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. — 186 с.
3. Смирнов, А. Н. Физическое моделирование процессов перемешивания металла в конвертере с комбинированной продувкой [Текст] / А. Н. Смирнов, Е. Н. Лебедев, К. Н. Шарандин // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* — 2010. — № 7. — С. 44–46.

4. Смирнов, А. Н. Исследование процессов перемешивания металла в сталеразливочном ковше при продувке инертным газом [Текст] / А. Н. Смирнов, С. Г. Жемеров // «Украинская ассоциация сталеплавильщиков» ДонНТУ. — 2010.

5. 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 : сборник научных трудов IV международной научно-технической конференции. — 2019. — С. 127–130.

© Куберский С. В.

© Романчук Я. А.

© Саратовский Р. Н.

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

Статья поступила в редакцию 22.06.2021.

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

PHYSICAL MODELING OF PULSATING MIXING OF METAL IN A STEEL LADLE

The paper presents the results of physical modeling of metal mixing process in a steel ladle when it is purged with argon supplied through two bottom purging devices in the form of a stationary and pulsating jet. The dynamics is analyzed and the opening area of water mirror is determined, as well as the influence of the purge intensity and the pulsation frequency on averaging time of the model liquid with stationary and pulsating gas supply is determined. The advantages of pulsation mixing in comparison with bubbling are shown.

Key words: *steel ladle, steel, slag, physical model, purge, inert gas, bubbling mixing, pulsation mixing, stationary jet, pulsating jet, intensity, flow rate, mirror, averaging.*