

УДК 669

Кошкарров А.А., Агапитов Е.Б., Бигеев В.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕВЕРСА В ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ ВАКУУМИРОВАНИЯ СТАЛИ

Аннотация. Увеличение потребительского рынка продукции черной металлургии устанавливает перед металлургами высокие требования к выпускаемой продукции. Основным из ключевых критериев является глубокая очистка металла от неметаллических примесей и растворенных газов. Для выполнения данных требований на металлургических заводах при выплавке широкое распространение получили агрегаты вакуумной дегазации RH-типа. Данные вакуумные агрегаты показали высокую эффективность, по сравнению с другими типами вакууматоров, при выплавке автокузовных, трубных, судостроительных и других марок стали. В мировой производственной практике вакуумные агрегаты RH-типа выходят на первые места при ковшевой обработке металла, оставляя агрегату печь-ковш только функцию нагрева и глубокой десульфурации при производстве высококачественных марок сталей. Исходя из этого, высокую актуальность получают работы по изучению процессов, происходящих при вакуумной обработке металла, а также работы по повышению стойкости футеровки вакууматора и снижению неметаллических включений, которые поступают в металл из футеровки. В данной работе рассматриваются вопросы загрязнения металла за счет износа футеровки вакууматора, выявлены зоны застоя металла в сталеразливочном ковше, а так же представлена схема модернизации вакууматора RH-типа.

Ключевые слова: реверс, застойные зоны, циркуляция, вакуумная дегазация, моделирование, неметаллические включения.

В связи с повышением уровня требований к высококачественной стали и росте заказов металлургические предприятия увеличивают долю металла, проходящего вакуумную обработку до 80%. Здесь наряду с дегазацией и обезуглероживанием металла решается еще одна важная задача – удаление неметаллических включений.

Как правило, главную роль в формировании неметаллических включений играют продукты раскисления стали алюминием, поэтому основная часть неметаллических включений представляется корундом (Al_2O_3) и шпинелями ($Mn \cdot Al_2O_3$; $MgO \cdot Al_2O_3$; $FeO \cdot Al_2O_3$). Снижение содержания неметаллических включений различной природы при ковшевой обработке вакуумом происходит преимущественно механическим путем в результате переноса их на межфазные поверхности, а также флотации газовыми пузырьками. При этом на поверхности жидкой стали или на твердой поверхности образуется шлаковая пленка. Процесс протекает в три стадии:

- 1) перенос к межфазной поверхности;
- 2) зацепление за межфазную поверхность;
- 3) ассимиляция жидкой неметаллической фазой (шлаком) или спекание с твердой фазой.

Лимитирующим звеном процесса является перенос включений к межфазной поверхности. Этот перенос может осуществляться при всплывании включений в металле или массопереносе их с потоками металла.

Всплывание включений, скорость которого пропорциональна квадрату радиуса частицы (формула Стокса), играет некоторую роль лишь в начальный период после ввода раскислителей в сталь с высоким содержанием кислорода, когда образуются крупные включения диаметром более 15–20 мкм. Существен-

ное значение в процессах внепечной обработки имеет массоперенос включений с потоками металла, и решающее влияние на удаление неметаллических включений оказывает интенсивность перемешивания.

При интенсивном перемешивании лимитирующим звеном может быть и вторая из приведенных выше стадий – зацепление. Это связано с тем, что включение, которое плохо «зацепилось» за межфазную поверхность, может быть вновь унесено потоком металла. Вероятность прочного зацепления увеличивается с повышением энергии межфазного натяжения на границе включение – металл. Поэтому при интенсивном перемешивании лучше удаляются включения корунда (Al_2O_3), имеющие большую межфазную энергию на границе с металлом, чем силикаты. По-видимому, этому способствует и остроугольная форма кристаллов корунда, благодаря чему они прокалывают межфазную поверхность [1].

Одним из основных путей повышения эффективности вакуумирования является увеличение интенсивности циркуляции металла, при этом неизбежно возрастает динамическая нагрузка на футеровку вакуум-камеры, что приводит к её ускоренному разрушению, попаданию части неметаллических включений экзогенной природы в сталь и необходимости частой смены футеровки. В этой связи актуальны исследования по поиску различных вариантов обработки, способствующих повышению стойкости вакууматора и сокращению продолжительности операции вакуумирования.

За время эксплуатации установок вакуумирования стали RH-типа на ПАО «ММК» была выявлена характерная проблема неравномерного износа футеровки погружных патрубков, а также мест стыка патрубков и днища (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Вид сверху футеровки всасывающего патрубка и разгара по основному кольцу

Также одним из факторов, определяющим износ футеровки вакууматора, является время вакуумирования. Исследования авторов [2] показали, что сокращению времени вакуумирования способствует образование циркуляционной зоны на выходе из всасывающего патрубка. Увеличение линейной скорости расплава на огибающей вихря уменьшает внешнее давление на пузыри, что приводит к увеличению их объема и площади межфазной поверхности. Реакционная поверхность «газ – сталь» в этой области завихрения резко увеличивается и по оценкам доли этой поверхности около 30% гетерогенных реакций происходит именно здесь [3–5]. Это способствует резкому ускорению процессов обезуглероживания и дегазации стали.

Учитывая этот факт, можно однозначно связывать увеличение реакционной поверхности за счет организации дополнительных зон циркуляции расплава с сокращением времени обработки.

Несмотря на широкое внедрение прогрессивных технологических решений при вакуумировании стали, резервы повышения эффективности еще не исчерпаны, поэтому работы по совершенствованию продолжают. Определенной проблемой является наличие

застойных зон при вакуумировании, которые затрудняют выполнение задач вакуумирования. На фоне ужесточения требований к качеству готовой продукции и увеличения пропускной способности оборудования это является одним из серьезных препятствий для их выполнения.

Одним из решений данной проблемы является организация переменной – реверсной циркуляции расплава за счет симметричной установки дополнительных аргоновых сопел – пробок на сливном патрубке вакууматора. Понимание, что данная технология позволит продлить межремонтный период, выровнять износ футеровки не вызывает сомнений. Однако в качестве негативных моментов высказывалось предположение, что необходимость обеспечения «незаливания» газовых сопел в сливном патрубке вызовет потребность в поддержании в нем некоторого минимального расхода аргона, снизит скорость циркуляции металла и удлинит цикл обработки. Исследования, проведенные авторами данной статьи, направлены на количественную оценку этих прогнозируемых негативных воздействий.

Организация переменного движущихся потоков должна обеспечить создание режима «разрушения» застойных зон металла и способствовать выводу из них неметаллических включений.

Для качественной и количественной оценки изменения гидродинамики при реверсной циркуляции металла было проведено физическое моделирование этого процесса в гидродинамической модели вакууматора (рис. 2). Лабораторная модель вакууматора была выполнена в масштабе 1:10. На основании теории подобия физических процессов при моделировании стремились, чтобы одноименные безразмерные критерии, определяющие гидродинамику, были подобны.

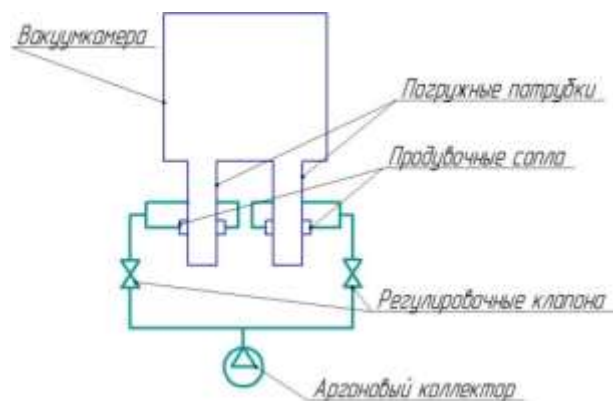


Рис. 2. Схема лабораторной установки

На основании аналитического обзора литературы [6] в качестве моделируемой системы «расплав стали – аргон» была выбрана система «вода – воздух», так как кинематические вязкости воды и жидкого металла близки. Физические свойства сред приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства веществ

Параметр	Жидкость		Газ	
	Вода	Сталь	Воздух	Аргон
Кинематическая вязкость, м ² /с	10 ⁻⁶	0,913·10 ⁻⁶	0,151·10 ⁻⁶	0,124·10 ⁻⁶
Плотность, кг/м ³	1000	7010	1,29	1,784

Линейные размеры модели определяли на основе выбранного коэффициента подобия:

$$K = \frac{D_1}{D_2} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{h_1}{h_2} = \frac{2714}{271,4} = \frac{720}{72} = \frac{2000}{200} = 10, \quad (1)$$

где D_1 и D_2 – диаметры вакуум-камеры реальной и масштабной модели, мм;

d_1 и d_2 – диаметры погружных патрубков реальной и масштабной модели, мм;

h_1 и h_2 – высота патрубков реальной и масштабной модели, мм.

Чтобы физическое подобие водяной модели вакууматора соблюдалось, необходимо было выполнить равенство числа Re в модели и реальном агрегате:

$$Re = \frac{\omega_1 \cdot d_1}{\nu_1} = \frac{\omega_2 \cdot d_2}{\nu_2}, \quad (2)$$

где ω_1 и ω_2 – скорость движения жидкого металла и воды;

d_1 и d_2 – внутренние диаметры патрубков вакууматора и масштабной модели;

ν_1 и ν_2 – кинематические вязкости жидкого металла и воды.

Аналогично рассчитывались числа Re для всплывающих пузырьков аргона и воздуха. По выражению (2) видно, что при фиксации кинематической вязкости и диаметров сечения патрубков при моделировании для выполнения условия (2) необходимо управлять скоростью движения воды в модели. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Критерии подобия

Параметр	Жидкость		Газ	
	Вода	Сталь	Воздух	Аргон
Число Рейнольдса	7,886·10 ⁵ – 1,183·10 ⁶		5,481·10 ⁷	
Скорость, м/с	11 – 16,5	1 – 1,5	115	9,5

Учитывая, что в масштабной модели моделируется только гидродинамика движения жидкости, соблюдение данного подобия считали достаточным. Также при физическом моделировании гидродинамики движения расплава в вакууматоре были приняты следующие допущения:

- моделирование проводилось при атмосферном постоянном давлении без вакуума;
- объем вакуум-камеры и погружных патрубков, в которых происходит исследование гидродинамики, изначально заполнен жидкостью;

– количество продувочных сопел по одному на патрубок;

– тангенциальное движение жидкости в патрубках не обеспечивается.

Так как при проведении моделирования над поверхностью воды не создавали вакуум, то скорость подъема пузырей воздуха ожидаемо была на несколько порядков ниже расчетной, а, как следствие этого, скорость воды была отлична от расчетной. Данный случай описывается уравнением Бернулли:

$$dP + \rho g dz + \frac{\rho dW^2}{2} = 0, \quad (3)$$

где dP – пьезометрическое давление;

$\rho g dz$ – геометрическое давление;

$\frac{\rho dW^2}{2}$ – скоростное давление.

Исходя из выражения (3) скорость подъема пузырька аргона в жидком металле составляет 45–50 м/с при давлении над поверхностью металла 66,6 Па (0,001 атм). Тогда скорость подъема пузырька воздуха в воде составит 0,45–0,5 м/с при давлении над поверхностью воды 101000 Па (1 атм). Следовательно, скорость воды в масштабной модели должна быть на уровне $v_b \approx 0,11$ м/с.

Коэффициент циркуляции расплава стали в базовом варианте работы вакууматора принимали за единицу. Так как при работе установки в реверсном режиме циркуляции на неактивные продувочные пробки подается минимальный расход аргона, возле стен неактивных патрубков расплав стали неизбежно теряет свою скорость, и коэффициент циркуляции изменяется. Для оценки скорости движения жидкости при барботаже вводили цветные маркеры и анализировали скорость их перемещения на кадровых снимках видеоизображения. Скорость всплывания пузырьков газа определяли аналогичным методом, подсвечивая передний план установки и затеняя задний. Некоторые результаты моделирования показаны на рис. 3.

Результаты исследований показали, что скорость всплывания пузырей воздуха от активного сопла находилась на уровне 0,25 м/с, от неактивного – на уровне 0,14 м/с и скорость движения цветных маркеров 0,12 м/с.

Сравнивая полученную скорость с расчетной (с учетом введенных допущений), видно, что расчетная скорость соответствует скорости на модельной установке.

Так как пузыри воздуха от неактивного сопла поднимались и создавали некое сопротивление для пристеночных слоев воды, то скорость циркуляции снижалась. Также при помощи раскадровки была определена скорость циркуляции воды без встречного потока воздуха, которая составила 0,124 м/с.

Таким образом, можно сделать вывод, что скорость циркуляции пристеночных слоев воды замедляется на 3–4%, а коэффициент циркуляции при этом составит 0,974.



Рис. 3. Кадры видеосъемки изучения гидродинамики циркуляционного вакуумирования:

- — траектория движения маркера (капли красителя);
- — траектория движения пузырька от неактивного сопла

При подаче равных расходов на активное и неактивное сопло происходил срыв общей циркуляции с образованием макроциркуляционных зон в каждом патрубке (см. рис. 3).

В ходе экспериментов планировали получить ответы на следующие вопросы:

- насколько затормаживается скорость циркуляции металла при данной схеме работы вакууматора;
- насколько ниже скорость подъема пузыря аргона при минимальном расходе, чем при максимальном;

– определение застойных зон металла и как быстро они разрушаются.

Были проведены три группы опытов (рис. 4):

- 1) продувка с минимальным расходом на неактивные пробки;
- 2) продувка с одинаковым расходом транспортирующего газа на оба патрубка;
- 3) определение времени восстановления циркуляции после снижения расхода газа на одном из патрубков от максимального до минимального.

При подаче газа только через один патрубок диагностировалась зона застоя между патрубками, которая разрушалась при организации реверсной обработки.

Скорость восстановления циркуляции воды после изменения расхода на одном из патрубков стабилизировалась через 2–4 с. Сокращение времени обработки в вакууматоре создает предпосылки для снижения затрат электроэнергии в агрегатах ковш – печь [7, 8].

Во втором этапе физического моделирования была собрана новая установка с имитацией сталеразливочного ковша, в котором также был ряд допущений:

- моделирование проводилось при атмосферном постоянном давлении без вакуума;
- объем вакуум-камеры и погружных патрубков, в которых происходит исследование, изначально заполнен жидкостью;
- количество продувочных фурм десять, по пять на патрубок;
- модель ковша выполнена в виде цилиндра, и уменьшен объем.

На рис. 5 представлены кадры первого опыта второго этапа физического моделирования, где наблюдается образование устойчивой застойной зоны между патрубками.

В данном опыте помимо выявления застойной зоны, наблюдалась зона активной циркуляции жидкости, которая формировалась в виде эллипсоида. Также

в ходе наблюдения было выявлено, что при увеличении расхода газа на активные продувочные фурмы одного из патрубков зона застоя под патрубками вытягивалась, а также вытягивалась зона циркуляции и начинала захватывать придонные слои жидкости. Данный эффект хорошо виден при втором опыте, где определялись застойные зоны около стен сталеразливочного ковша (рис. 6).

На всех кадрах видно, что отрыв жидкости от стен ковша происходит не активно. Также видно, что застойные зоны под патрубками и около стен сливаются в одну (кадр 3), огибая зону циркуляции, но при этом часть жидкости из застойной зоны поступает в зону циркуляции. После увеличения расхода воздуха на рабочие фурмы патрубка зона циркуляции начала охватывать придонные зоны жидкости (кадр 5). На кадрах с 3-го по 6-й можно наблюдать зону полного застоя жидкости под патрубком, который работает как подъемный. В данной зоне практически отсутствует усреднение жидкости с остальным объемом.

В последнем опыте после установления застойной зоны включался реверс, который после возобновления циркуляции в обратном направлении позволил за короткие временные сроки разрушить застойную зону в модели сталеразливочного ковша, а также произвести полное усреднение жидкости в нем. Результаты данного опыта отображены на кадрах опыта (рис. 7).



Подача газа: 50 / 50 % (срыв циркуляции)



Подача газа: 10 / 90 %

Рис. 4. Результаты опытов

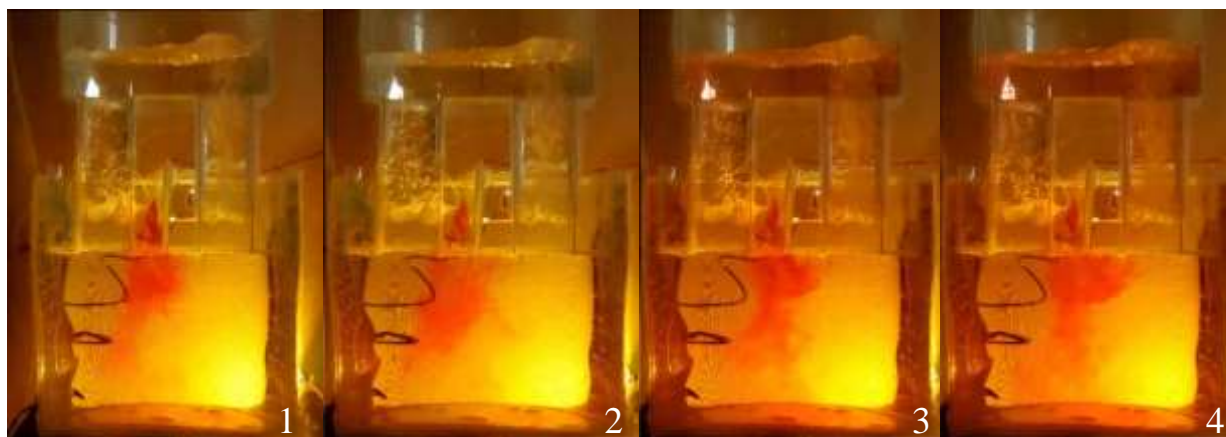


Рис. 5. Кадры опыта определения застойной зоны между патрубками

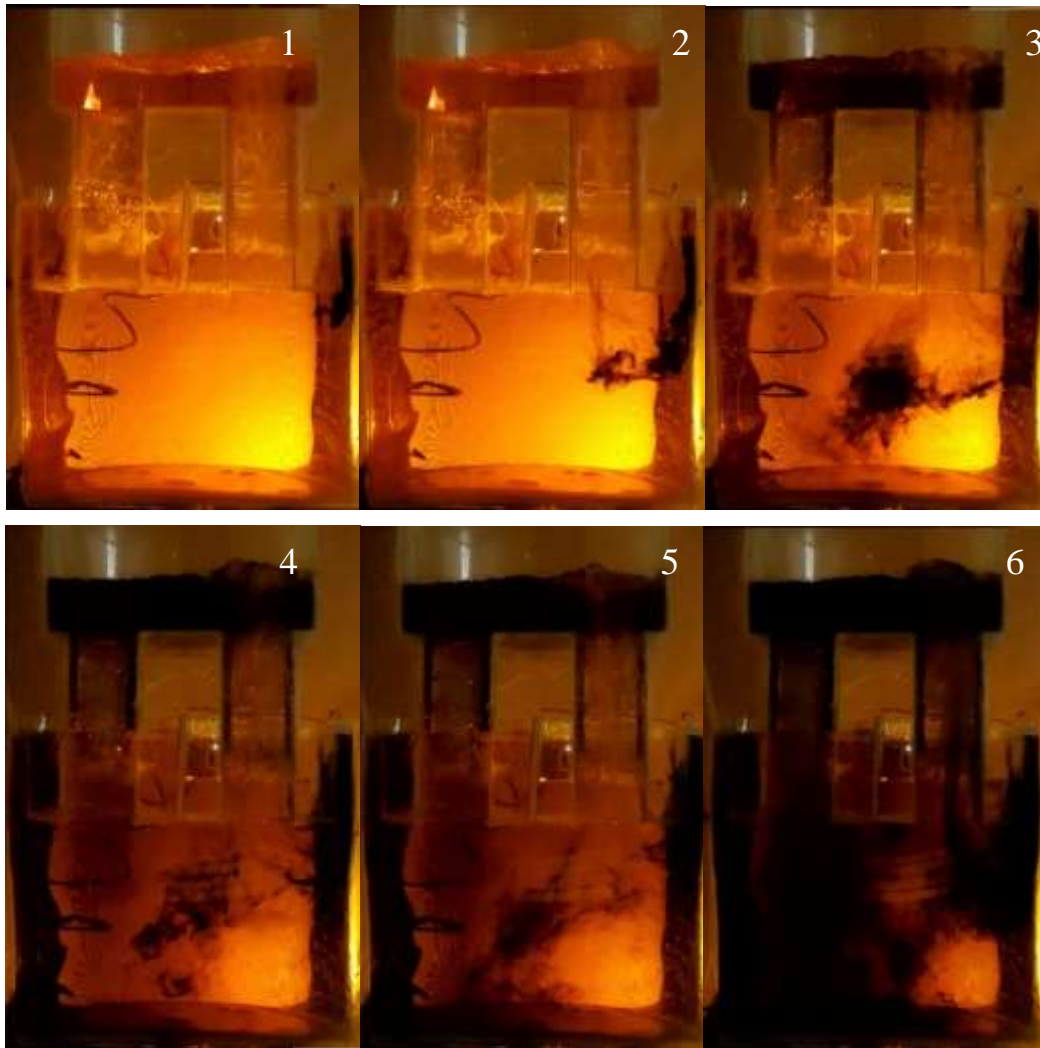


Рис. 6. Кадры опыта определения застойной зоны около стен сталеразливочного ковша

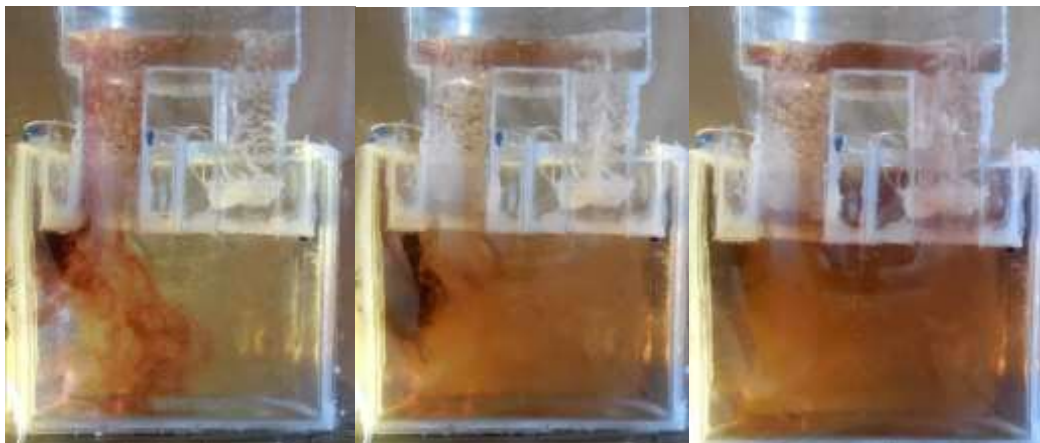


Рис. 7. Кадры опыта включения реверса

Выводы: 1) по результатам проведенных исследований с помощью цветных маркеров при работе двух сопел и соотношении расходов газа 10/90% скорость циркуляции снижается незначительно и составляет 0,97% от базового варианта, когда 100% газа подается через одно сопло;

2) таким образом, организация реверса создает условия для сокращения времени обработки расплава в вакууматоре;

3) организация двух переменных работающих подъемных патрубков возможна;

4) при подаче малого расхода газа на неактивные фурмы одного из патрубков в камере вакууматора создается дополнительный барботаж на границе «газ-металл», что позволяет увеличивать реакционную поверхность металла;

5) влияние зон застоя жидкости на усреднение металла во время процесса вакуумной обработки можно уменьшать за счет включения реверсной циркуляции;

6) применяемые способы снижения влияния застойных зон на процесс усреднения действенны, но не имеют более полного эффекта.

Список литературы

1. Изучение кинетических закономерностей обезуглероживания расплава в условиях циркуляционного вакуумирования стали конвертерного цеха № 1 НЛМК (по материалам X Международного конгресса сталеплавильщиков) // Черная металлургия, бюл. НТИ. 2010. № 5. С. 55–59.
2. Протасов А.В., Сивак Б.А., Чиченев Н.А. Машины и агрегаты металлургического производства. Агрегаты внепечной обработки жидкой стали: курс лекций: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. «Металлургия». М.: Изд-во МИСиС, 2009. 181 с.
3. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. 2. Основы и технология ковшовой металлургии: пер. с нем. М.: Металлургия, 1984. 414 с.
4. Бигеев В.А. Применение установки вакуумирования стали для десульфурации металла // Теория и технология металлургического производства. 2008. Вып. 8. С. 67.
5. Освоение технологии вакуумной дегазации стали на двухпозиционной установке комплекса МНЛЗ-6 ККЦ: [ОАО "ММК"] / О.А. Николаев, Д.Н. Чигасов, А.А. Степанова, С.В. Мещеров, С.В. Масьянов // Совершенствование технологии в ОАО «ММК». Магнитогорск: Полиграфия, 2011. Вып. 16. С. 87–92.
6. Гречко А.В., Нестеренко Р.Д., Кудинов Ю.А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. М.: Металлургия, 1976. 224 с.
7. Agapitov E.B., Nikolaev A.A., Lemeshko M.A. Complex research of energy efficiency of electric arc furnace ladle installations 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (FAR East Con-2018), St. Petersburg, 2018, pp. 1467 – 1470. doi:10.1109/EIConRus.2017.7910851.
8. Бигеев В.А., Агапитов Е.Б., Ерофеев М.М. Результаты обработки расплава стали на агрегате печь – ковш с полыми электродами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2007. №1(17). С. 36–38.

Сведения об авторах

Кошкарров Александр Андреевич – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: mcm@magtu.ru.

Агапитов Евгений Борисович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Бигеев Вахит Абдрашитович – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE REVERSE APPLICATION AT THE CIRCULATING UNIT FOR STEEL DEGAZZING ON THE HYDRODYNAMIC MODEL

Koshkarov Alexander Andreevich – PhD student of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: 8(3519)29-85-73. E-mail: mcm@magtu.ru

Agapitov Evgeniy Borisovich – Professor of Heat Engineering and Power Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Bigeev Vakhit Abdrashitovich – Professor of Metallurgy and Chemical Technology Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: 8(3519)29-85-73. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

Abstract. An increase in the consumer market for ferrous metallurgy products sets high requirements for finish product. The important criteria is deep cleaning of metal from non-metallic impurities and dissolved gases. To meet these requirements, RH-type vacuum degassing units are widely used at modern metallurgical plants. These vacuum

units have shown high efficiency in comparison with other types of vacuum equipment in producing such steels as auto-body steel, pipe steel and others. In the world industrial practice, RH-type vacuum units come out on top in ladle metal processing, leaving the ladle furnace unit only with the function of heating and deep desulfurization in the production of high-quality steels. So, the study of the processes occurring during the vacuum processing of metal, as well as work on increasing the durability of the lining of the evacuator and reducing non-metallic inclusions that enter the metal from the lining, is highly relevant. This paper discusses the issues of metal contamination due to wear of the lining of the evacuator, identifies the zones of stagnation of metal in the steel-pouring ladle, and also presents a diagram of the modernization of the vacuum degasser RH-type.

Key words: reverse, stagnant zones, circulation, vacuum degassing, modeling, non-metallic inclusions.

Ссылка на статью:

Кошкарлов А.А., Агапитов Е.Б., Бигеев В.А. Исследование на гидродинамической модели эффективности применения реверса в циркуляционной установке вакуумирования стали // Теория и технология металлургического производства. 2020. №4 (35). С. 17-24.

Koshkarov A.A., Agapitov E.B., Bigeev V.A. Study of the efficiency of the reverse application at the circulating unit for steel degassing on the hydrodynamic model. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 35, no. 4, pp. 17-24.