

УДК 669.04

Куберский С. В., *Крестин Р. В., Саратовский Р. Н., Сервитовский Я. Ю.*Донбасский государственный технический университет***E-mail: Jacks.m3x@mail.ru***УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПУЛЬСАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ**

Усовершенствована физическая модель сталеразливочного ковша для исследования пульсирующей продувки расплава через две пористые пробки. Предложенные изменения позволяют расширить возможности управления возникающими газодинамическими потоками в условиях реального времени и их визуализацию. Получены результаты, свидетельствующие о преимуществах пульсирующей продувки в сравнении со стационарной. Использование усовершенствованной модели обеспечит развитие теоретических представлений о механизмах гомогенизации расплавов, вторичного окисления и удаления неметаллических включений, что позволит предложить рекомендации для повышения эффективности технологии внепечной обработки.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, внепечная обработка стали, стационарная продувка, пульсирующая продувка, физическое моделирование, гомогенизация, вторичное окисление, неметаллические включения, рафинирование.

Процесс продувки металла инертными газами является одним из важных этапов современных технологий производства стали. Он используется для гомогенизации химического состава и температуры расплава, а также рафинирования его от газов и неметаллических включений. Эффективность такого способа обработки в значительной степени зависит от интенсивности подачи инертного газа, его расхода и количества продувочных узлов. Увеличение расхода газа и использование большего числа пробок ускоряет процессы выравнивания химического состава и температуры стали в объеме ковша. Однако более интенсивная продувка способствует повышению расхода инертного газа и огнеупоров, а также оголению зеркала и увеличению площади контакта расплава с окружающей средой, что способствует развитию процессов вторичного окисления. Кроме того, высокая стоимость продувочных узлов оказывает негативное влияние на величину расходов по переделу.

Поэтому необходимо искать новые технические и технологические решения, способствующие повышению эффективности процесса продувки стали инертными газами.

Одним из таких решений может быть переход от традиционной стационарной продувки расплава инертным газом к использованию пульсирующей его подачи. Это позволит уменьшить расход газа, сократить время для достижения однородности расплава и уменьшить интенсивность вторичного окисления расплава. Кроме того, такой подход будет положительно сказываться на стойкости огнеупорной футеровки.

Постановка задачи. Наибольшее распространение для изучения газодинамических процессов, имеющих место при обработке высокотемпературных расплавов в сталеразливочном ковше, получило физическое моделирование, включающее в себя постановку задачи, вывод и анализ условий подобия, выбор конструкции и расчет параметров модели объекта исследования, проведение экспериментов на модели и анализ полученных результатов [1].

Для моделирования процессов продувки расплава в сталеразливочном ковше была разработана его физическая модель в масштабе 1:8 относительно промышленного объекта [2]. Общий вид физической модели представлен на рисунке 1, а. Расположение двух продувочных узлов физической моде-

ли (рис. 1, б) соответствовало их расположению на промышленном объекте, включая удаление от вертикальной оси ковша.

Стоит обратить внимание на то, что у геометрически подобных систем должны быть постоянными соотношения площадей и объемов:

$$\frac{S_H}{S_M} = m^2 = const \text{ и } \frac{V_H}{V_M} = m^3 = const, \quad (1)$$

где S_H , S_M — соответственно площадь натурального объекта и физической модели;

V_H и V_M — соответственно объем натурального объекта и физической модели.



а



б

а — общий вид физической модели;
б — расположение продувочных узлов

Рисунок 1 — Общий вид физической модели

В качестве жидкости, моделирующей сталь и шлак, использовали воду и машинное масло различной вязкости, а в качестве продувочного газа — сжатый воздух. Подача воздуха осуществлялась от компрессора через газовый счётчик с последующим распределением на два продувочных узла по воздушным расходомерам.

Несколько физических систем могут быть геометрически подобными, если между их соответствующими размерами существует постоянное соотношение [3]:

$$\frac{H_H}{H_M} = \frac{D_H}{D_M} = \frac{d_H}{d_M} = \frac{l_H}{l_M} = m = const, \quad (2)$$

где H_H , H_M — высота сталеразливочного ковша натурального объекта и физической модели;

D_H , D_M — диаметр натурального объекта и физической модели в верхней части ковша;

d_H , d_M — диаметр натурального объекта и физической модели в нижней части ковша;

l_H , l_M — расстояние между продувочными узлами натурального объекта и физической модели.

Для определения влияния параметров продувки (расход аргона, количество продувочных узлов, режимов продувки) на динамику перемешивания расплава в ковше использовали методику, описанную в работе [2]. Однако в процессе проведения исследований были отмечены следующие недостатки физической модели, представленной на рисунке 1:

- отсутствие возможности отдельного регулирования расхода воздуха на каждый продувочный узел;

- отсутствие оперативного изменения режимов в ходе обработки и необходимость полной остановки процесса при переходе от одного режима продувки к другому;

- используемые для генерации переменного тока на датчики аккумуляторы не обеспечивали требуемых значений выходного напряжения.

Поэтому основная **цель** данной работы предусматривала усовершенствование существующей модели для повышения эффективности управления режимами продувки, регистрации параметров и визуализации процесса.

Объект исследования — технологический процесс аргонной продувки расплава в сталеразливочном ковше.

Предмет исследования — физическое моделирование технологических параметров процесса при пульсирующей подаче продувочного газа.

Задачи исследования:

– усовершенствование физической модели пульсирующей продувки расплава в сталеразливочном ковше;

– оценка времени гомогенизации модельной жидкости по рабочему объему физической модели при стационарном и пульсирующем режиме подачи продувочного газа;

– анализ влияния пульсирующей подачи продувочного газа на процесс гомогенизации модельной жидкости;

– определение направления последующих исследований рассматриваемого процесса.

Методика исследования. На первом этапе исследований в существующую модель были внесены следующие усовершенствования:

– установлены расходомеры РСМ-15 на каждый продувочный узел (рис. 2), позволяющие автономно определять расход продувочного газа;

– для реализации различных режимов продувки был разработан блок управления клапанами (рис. 3).

Данное устройство позволяет преобразовать выходной сигнал низкой частоты в диапазоне 0,3–6 Гц со звуковой карты компьютера в сигнал для управления двумя 12-вольтовыми клапанами, обеспечивая одинаковое время включенного и выключенного состояния клапана. Два электромагнитных клапана, используемые для подачи воздуха к продувочным узлам, могут работать по трем основным режимам:

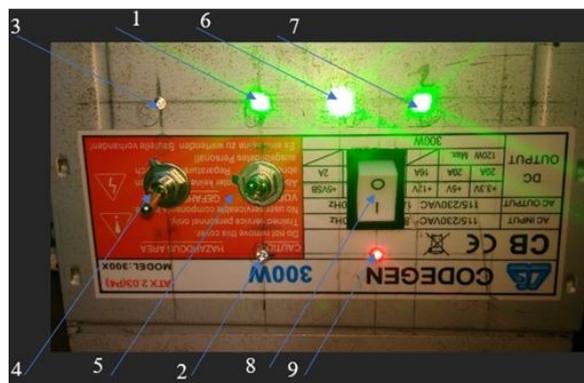
– одинаковая частота при синхронном открытии и закрытии клапанов;

– одинаковая частота при асинхронном открытии и закрытии клапанов;

– различная частота открытия и закрытия каждого клапана.



Рисунок 2 — Поплавковый расходомер газа РСМ-15



- 1, 2, 3, — диоды, сигнализирующие о включении соответствующего режима работы;
 4, 5 — тумблеры переключения режимов;
 6, 7 — диоды, сигнализирующие о работе левого и правого клапана; 8 — кнопка включения/отключения питания на клапаны;
 9 — диод подачи питания на клапаны

Рисунок 3 — Блок управления клапанами

Также появилась возможность смешанного режима продувки, при котором один клапан обеспечивает стационарный режим, а второй — пульсирующий. При этом расход продувочного газа на каждую пробку и частота пульсаций могут быть одинаковыми либо разными.

Было принято решение использовать блок синхронизации, содержащий восемь независимых дифференциальных входов, имеющих гальваническую развязку. Восемь датчиков подключались к цепи переменного тока, сформированного восемью независимыми источниками напряжения (5 В), и погружались в измеряемую среду (воду, солевой раствор). При измерении в чистой воде и солевом растворе напряжение на входе составляло 0–0,1 В и 4,2–4,8 В соответственно. В процессе измерения взаимное влияние показаний датчиков отсутствовало ввиду их гальванической развязки.

Внешний вид блока синхронизации датчиков представлен на рисунке 4.

Используемая на модели система позволяла обеспечить частоту подачи воздуха в диапазоне 1–300 пульсаций в минуту. При выборе расхода газа для моделирования процессов продувки были использованы данные действующего промышленного объекта. В частности, в условиях ООО «ЮГМК» продувка стали аргоном в ковшах ёмкостью 300 т через два продувочных узла осуществляется на протяжении всей обработки металла на АКП. При неудовлетворительной работе продувочной пробки либо при необходимости интенсификации массообменных процессов используется кратковременная или длительная подача аргона высокого давления (байпас) без оголения зеркала металла для пробивания продувочной пробки (1–3 мин) и для проведения процесса десульфурации до ввода алюминиевой проволоки. При выполнении данных технологических операций расход аргона составляет 250–600 л/мин. После введения в жидкий металл алюминиевой проволоки, а также после ввода порошковой проволоки, содержащей кальций, произво-

дят мягкую продувку расплава продолжительностью не менее 3 мин без оголения зеркала металла при расходе аргона 100–300 л/мин. Обеспечение гомогенизации состава и температуры расплава производится не менее 20 мин при расходе аргона 100–250 л/мин [4].

Для определения расхода вдуваемого газа на холодной физической модели использовалась формула [5]:

$$Q_M = \sqrt{\left(\frac{D_M}{D_H}\right)^5 \cdot \frac{\rho_G^M}{\rho_G^H} \cdot \frac{\rho_{Ж}^H - \rho_G^H}{\rho_{Ж}^M - \rho_G^M}} \cdot Q_H \quad (3)$$

где D_M и D_H — характерный размер для модели и натуре соответственно, м; ρ_G^M , ρ_G^H и $\rho_{Ж}^M$, $\rho_{Ж}^H$ — плотность жидкости и газа, кг/м³; Q_H — расход газа на объекте, м³.

Расчетные по формуле (3) значения расхода вдуваемого воздуха на один продувочный узел на модели представлены в таблице 1.



Рисунок 4 — Блок синхронизации датчиков

Таблица 1
Значения расхода вдуваемого газа

№	Расход газа на объекте, л/мин	Расход газа на модели, л/мин
1	50	1
2	100	2
3	150	3
4	200	4
5	250	5
6	300	6
7	350	7

Одним из наиболее эффективных методов определения степени гомогенизации модельной жидкости является электрохимический метод с введением в моделируемый раствор определенного количества раствора поваренной соли и одновременным измерением напряжения в различных точках объема модели с помощью специальных датчиков [6]. Повышение напряжения на датчике обусловлено тем, что при растворении в воде хлорида натрия он распадается на ионы (Na^+ и Cl^-), которые могут свободно передвигаться в растворе. Концентрация NaCl в растворе непосредственно влияет на его электропроводность. Чем выше концентрация раствора, тем больше ионов Na^+ и Cl^- в нем и выше его электропроводность [7].

Перед проведением эксперимента по электрохимическому определению времени гомогенизации модельной жидкости необходимо провести калибровку датчиков. Для этого все используемые датчики одновременно помещались в чистую воду, включался блок синхронизации, подающий напряжения на датчики, и запускалось программное обеспечение LGraph2, в рабочем окне которого отображаются разноцветные линии напряжения, характерные для каждого из датчиков.

Показания, получаемые от каждого из датчиков, позволяют оценить степень однородности модельного раствора в объеме ковша после добавления электролита. Чтобы получить информацию от датчиков, они были подключены через блок синхронизации к аналогово-цифровому преобразователю АЦП (E-154), который подключен к компьютеру с установленным программным обеспечением LGraph2.

В чистой воде все датчики показывают напряжение, равное или близкое к 0 В. Затем датчики погружали в раствор NaCl определенной концентрации.

Опытным путем было определено, что концентрация NaCl в растворе должна составлять 0,5 %, что обусловлено рабочим

диапазоном напряжений блока синхронизации (0–5 В). При обеспечении данной концентрации соли в растворе напряжение на датчиках должно находиться в диапазоне 2,5–3,0 В. При отклонении датчиков от этого диапазона производится подстройка значений регулируемым резистором.

После калибровки отключали устройство, вытирали датчики насухо и располагали их вблизи стенок (4 датчика), днища ковша (2 датчика), а также в центре физической модели (2 датчика) с помощью быстросъемных фиксаторов (рис. 5).

Для того чтобы в общем объеме модели (92 л) концентрация соли достигала 0,5 % при температуре окружающей среды (10 °С), необходимо приготовить раствор из 470 г NaCl и 1,5 л воды. После проведения всех приготовлений:

- ковш заполняли водой до отметки в 90 л;
- ресивер компрессора наполняли до максимального объема (25 л);
- открывали воздушный клапан с ранее выставленным расходом воздуха на расходах;
- запускали запись данных в программе LGraph2;
- выливали приготовленный солевой раствор в модель ковша, заполненную чистой водой.

Так как раствор имеет большую плотность по сравнению с чистой водой, он погружался на дно и вовлекался в перемешивание; при подходе его к датчикам величина фиксируемого напряжения была близка к 5 В и в ходе эксперимента непрерывно снижалась. Через определенное время показания на всех датчиках выравнивались, что свидетельствовало об усреднении модельного раствора и окончании эксперимента. В этом случае нажатием кнопки «стоп» в программе LGraph2 заканчивали запись и сохраняли данные в двух форматах (изображение с показаниями напряжений и текстовый массив данных с цифровыми значениями) для дальнейшей обработки и построения графиков.

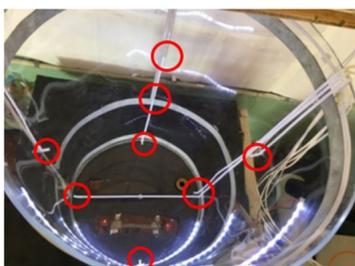


Рисунок 5 — Расположение считывающих датчиков

На рисунке 6 представлены наглядные результаты электрохимического метода измерения гомогенизации, отображаемые в программе LGraph2.

Для оценки работоспособности усовершенствованной модели были проведены эксперименты, предусматривающие стационарную и пульсирующую подачу воздуха в модельную жидкость.

При стационарном режиме продувки два продувочных узла постоянно находились в открытом положении и обеспечивали расход воздуха 6 л/мин (по 3 л на каждый продувочный узел). Обработка результатов экспериментов в Excel позволила определить среднее время гомогенизации модельной жидкости (по трём опытам), которое составило 40 с.

Вторая серия опытов предусматривала синхронный пульсирующий режим продувки, когда оба клапана работают с одной частотой и открываются и закрываются одновременно. Расход продувочного газа был идентичен стационарному, но клапаны открывались с частотой 30 пульсаций в минуту (п/мин), то есть время открытого и закрытого состояния клапана было одинаковым (каждый клапан открывался на 1 с, а затем закрывался на такое же время). Выбор данной частоты обусловлен тем, что в работе [2] при низкой частоте пульсаций в момент паузы оголившееся зеркало воды (в реальных условиях расплава) успевало заново покрыться маслом (в реальных условиях шлаком), что в реальных условиях обеспечит значительное снижение интенсивности процессов вторичного окисления расплава в результате его взаимодействия с кислородом и азотом воздуха окружающей среды.

Среднее время гомогенизации модельной жидкости при использовании пульсирующей подачи воздуха (по трём опытам) составило 36,50 с.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунке 7.

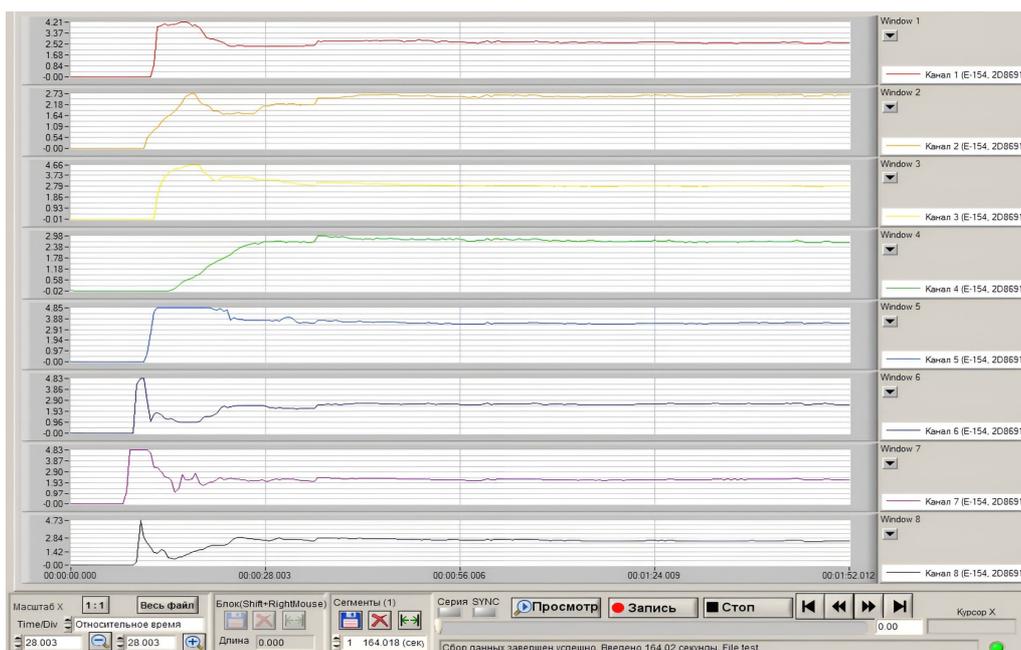


Рисунок 6 — Результат электрохимического метода изменения гомогенизации расплава

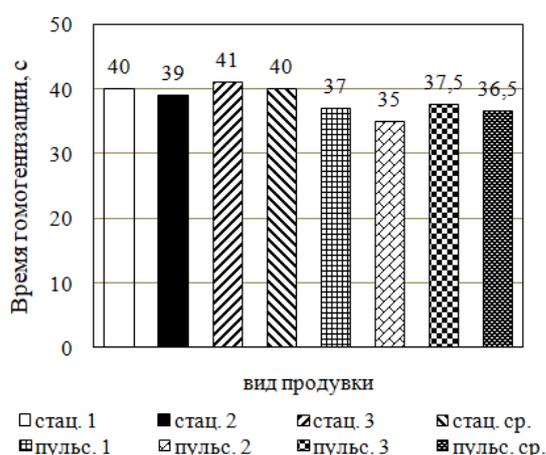


Рисунок 7 — Время, затраченное на гомогенизацию модельной жидкости при различных режимах продувки

Данные, представленные на рисунке 6, свидетельствуют о том, что при использовании пульсирующего режима продувки время, затрачиваемое на гомогенизацию модельной жидкости, уменьшается более чем на 9 % в сравнении со стационарным режимом работы продувочных узлов, несмотря на одинаковый расход продувочного газа. Это способствует увеличению эффективно-

сти процесса, экономии времени и снижению общих энергозатрат на обработку.

Выводы и направления дальнейших исследований.

1. Усовершенствована физическая модель сталеразливочного ковша, позволяющая исследовать процессы аргонной продувки железоуглеродистого расплава с использованием пульсирующей подачи рафинировочного газа.

2. Показано, что при пульсирующей продувке и одинаковом расходе продувочного газа время гомогенизации раствора уменьшается более чем на 9 % в сравнении со стационарной продувкой, что обеспечит повышение производительности АКП и снижение расходов по переделу.

Дальнейшие исследования будут направлены на проведение многофакторных экспериментов с использованием широких диапазонов расходов газа, количества пульсаций, а также различных технологий подачи продувочного газа, в т. ч. процессов совмещенной продувки, когда на одной пробке реализуется стационарный режим, а на второй — пульсирующий.

Список источников

1. Еронько С. П., Быковских С. В. *Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разлива стали*. К. : Техника, 1998. 136 с.
2. Куберский С. В., Романчук Я. А., Саратовский Р. Н. *Физическое моделирование пульсационного перемешивания металла в сталеразливочном ковше // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 23 (66). С. 47–55.*
3. Цымбал В. П. *Математическое моделирование металлургических процессов*. М. : Металлургия, 1987. 239 с.
4. *ТИ 229-СТ ККП-0117-151-2023. Технологическая инструкция по обработке стали на установке ковши-печь*. Алчевск : ООО «ЮГМК», 2023. 36 с.
5. Кутателадзе С. С. *Анализ подобия и физические модели*. Новосибирск : Наука, 1986. 296 с.
6. Смирнов А. Н., Жемеров С. Г. *Исследование процессов перемешивания металла в сталеразливочном ковше при продувке инертным газом [Электронный ресурс] // Украинская Ассоциация Сталеплавильщиков : [сайт]. [2018]. URL: <https://www.uas.su/articles/metequipment/00002/00002.php>.*
7. *Экспериментальное изучение влияния минерализации раствора NaCl и других солей на удельное электрическое сопротивление раствора / О. М. Пономаренко, К. А. Истомина, Л. Д. Макашева, Большаков М. Н. // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. № 4 (27). 8 с. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art7*

© Куберский С. В., Крестин Р. В., Саратовский Р. Н., Сервитовский Я. Ю.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Должиковым В. В.,
ведущим инженером технического отдела управления ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 15.12.2023.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Куберский Сергей Владимирович, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Крестин Роман Валерьевич, аспирант каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: Jacks.m3x@mail.ru

Саратовский Руслан Николаевич, канд. техн. наук, директор НИПКИ «Параметр»

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: nipki@dstu.education

Сервитовский Ярослав Юрьевич, магистрант каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: servitovskaya@gmail.com

Kuberskiy S. V., *Krestin R. V., Saratovskiy R. N., Servitovskiy Ya. Yu. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, *e-mail: Jacks.m3x@mail.ru)

IMPROVEMENT OF THE PHYSICAL MODEL OF PULSATION MELT MIXING IN STEEL-POURING LADLE

A better-defined physical model of the steel-pouring ladle is used to analyze the pulsating blow of the liquid alloy through two porous plugs. The proposed modifications allow for extending the possibilities of controlling and visualizing emerging gas dynamic flows in real time. The advantages of a pulsating blow over a stationary one is shown in the results. The use of an advanced model will provide the development of theoretical understanding about melt homogenization, secondary oxidation, and non-metallic inclusion removal, which will allow to propose recommendations on improving the efficiency of secondary steelmaking technology.

Key words: steel-pouring ladle, secondary steelmaking, stationary blow, pulsating blow, physical modeling, homogenization, secondary oxidation, non-metallic inclusion, refining.

References

1. Eron'ko S. P., Bykovskih S. V. *Physical modeling of processes of secondary steelmaking and steel teeming [Fizicheskoe modelirovanie processov vnepechnoj obrabotki i razlivki stali]*. K. : Tekhnika, 1998. 136 p. (rus)
2. Kuberskiy S. V., Romanchuk Ya. A., Saratovskiy R. N. *Physical modelling of pulsation melt mixing in steel-pouring ladle [Fizicheskoe modelirovanie pul'sacionnogo peremeshivaniya metalla v stalerazlivochnom kovshe]*. Scientific works collection of DonSTI. 2021. Iss. 23 (66). Pp. 47–55. (rus)
3. Cymbal V. P. *Mathematical modeling of metallurgical processes [Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh processov]*. M. : Metalurgija, 1987. 239 p. (rus)

4. TI 229-ST KKP-0117-151-2023. *Technology guidelines for steel processing at the ladle furnace [Tekhnologicheskaya instrukciya po obrabotke stali na ustanovke kovsh-pech']*. Alchevsk : OOO "YuGMK". 2023. 36 p. (rus)

5. Kutateladze S. S. *Similarity analysis and physical models [Analiz podobiya i fizicheskie modeli]*. Novosibirsk : Nauka, 1986. 296 p. (rus)

6. Smirnov A. N., Zhemerov S. G. *Study of metal mixing processes in the steel-pouring ladle during blowing with inert gas [Issledovanie processov peremeshivaniya metalla v stalerazlivochnom kovshe pri produvke inertnym gazom]*. Ukrainskaya Associaciya Staleplavil'shchikov. 2018. (rus) URL: <https://www.uas.su/articles/metequipment/00002/00002.php>.

7. Ponomarenko O. M., Istomina K. A., Makasheva L. D., Bol'shakov M. N. *Experimental study of influence of solution NaCl mineralization and other salts on the electrical solution resistivity [Eksperimental'noe izuchenie vliyaniya mineralizacii rastvora NaCl i drugih solej na udel'noe elektricheskoe soprotivlenie rastvora]*. Aktual'nye problemy nefi i gaza. 2019. No. 4 (27) 8 p. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art7 (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuberskiy Sergey Vladimirovich, PhD in Engineering, Professor of Department of Metallurgical Technologies
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Krestin Roman Valerievich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Technologies
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: Jacks.m3x@mail.ru

Saratovskiy Ruslan Nikolayevich, PhD in Engineering, Director of the Research and Design Institute "Parameter"
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: servitovskaya@gmail.com

Servitovskiy Yaroslav Yurievich, Candidate for a Master's Degree of the Department Metallurgical Technologies
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: servitovskaya@gmail.com