

УДК 62-932.2  
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4154  
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

## Дегазация стали в сталеплавильных агрегатах непрерывного действия

В.А. Мурашов<sup>1</sup>✉, К.В. Строгонов<sup>1</sup>, А.А. Борисов<sup>2</sup>, Д.Д. Львов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, г. Москва

<sup>2</sup> Государственный университет просвещения, Россия, г. Мытищи

✉ MurashovViacA@mpei.ru

**Аннотация.** Требования к качеству стальной продукции диктуют необходимость увеличения доли вакуумированной стали. Помимо этого, рост себестоимости топлива, а также стремление общества и государства к декарбонизации различных отраслей промышленности, в том числе и чёрной металлургии, требует от компаний снижения топливных затрат и переход на более современные и чистые технологии. Снижение удельного потребления топлива, а соответственно, и выбросов возможно за счёт перехода на непрерывное производство с минимизацией затрат на прогрев оборудования и поддержание заданной температуры в вакууматоре в процессах технологического простоя. В статье рассматриваются вопросы дегазации стального расплава в вакууматорах непрерывного действия П-образного типа в сталеплавильных агрегатах непрерывного действия. **Цель:** рассмотреть влияние разряжения над расплавом на характерный размер пузырька газа, скорость и время его всплытия в дегазационной установке П-образного типа, на основе полученных зависимостей определить характерные размеры вакуум-камеры и энергетический эффект от перехода на непрерывный процесс вакуумирования. **Методы:** аналитические методы. **Результаты.** Определен характерный размер пузырька в расплаве стали под действием вакуума разной степени. Изучено влияние разряжения на скорость вакуумирования и габариты дегазационной установки. Определен энергетический эффект от перехода на непрерывное вакуумирование. Предложенная методика справедлива для жидких сред, расчёты представлены на примере расплава стали. На основе проведённых расчётов установлено влияние разряжения на процесс вакуумирования расплава стали, определены габариты вакуум-камеры, сопоставимые с представленными на рынке РН-вакууматорами при схожей производительности и качестве готовой продукции, и оценено снижение энергозатрат при дегазации стали в непрерывном вакууматоре, в сравнении с действующими циркуляционными установками.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, вакуумирование, сталь, расплав, разрежение, сталеплавильный агрегат непрерывного действия

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и исследование конструктивных решений для использования водорода и повышения эффективности процесса восстановления железа при производстве стали» при поддержке гранта Национального исследовательского университета «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022–2024 гг.

**Для цитирования:** Дегазация стали в сталеплавильных агрегатах непрерывного действия / В.А. Мурашов, К.В. Строгонов, А.А. Борисов, Д.Д. Львов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 140–147. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4154

UDC 62-932.2  
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4154

## Steel degassing in continuous steel melting units

V.A. Murashov<sup>1</sup>✉, K.V. Strogonov<sup>1</sup>, A.A. Borisov<sup>2</sup>, D.D. Lvov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> State University of Education, Mytishchi, Russian Federation

✉ MurashovViacA@mpei.ru

**Abstract.** The requirements for the quality of steel products dictate the need to increase the share of evacuated steel. In addition, the growing cost of fuel, as well as the desire of society and the state to decarbonize various industries, including ferrous metallurgy, requires companies to reduce fuel costs and switch to more modern and cleaner technologies. Reducing the specific fuel consumption, and, accordingly, emissions, is possible due to the transition to continuous production, minimizing the cost of heating the equipment and maintaining the set temperature in the degasser during technological downtime. The article deals with the issues of steel melt degassing in U-type continuous degassers in continuous steel making units. **Aim.** To consider the influence of rarefaction of a gas bubble on the characteristic size over the melt, speed and time of its surfacing in a U-type degassing unit. Based on the obtained dependences, to determine the characteristic size of a vacuum chamber and energy effect of switching to a continuous vacuumization. **Methods.** Analytical methods. **Results.** The authors have determined a bubble characteristic size in a steel melt under vacuum of different degrees. They studied the effect of vacuum on vacuumization speed and the degassing unit dimensions. The energy effect of switching to continuous vacuumization was determined. The proposed methodology is valid for liquid media, the calculations are presented on the example of molten steel. Based on the conducted calculations, the depression influence on molten steel vacuumization was determined. The vacuum chamber dimensions, comparable with RH-vacuum cleaners presented at the market of similar productivity and quality of finished products, as well as reducing energy consumption for steel degassing in a continuous vacuum degasser, compared with the existing circulating installation, were determined.

**Keywords:** energy efficiency, vacuuming, steel, melt, vacuum, continuous steel making unit

**Acknowledgments:** The investigation was carried out within the framework of the project “Development and research of design solutions for using hydrogen and increasing iron reduction efficiency in steel production” with the support of a subvention from National Research University “Moscow Power Engineering Institute” for implementation of the internal research program “Priority 2030: Future Technologies” in 2022–2024.

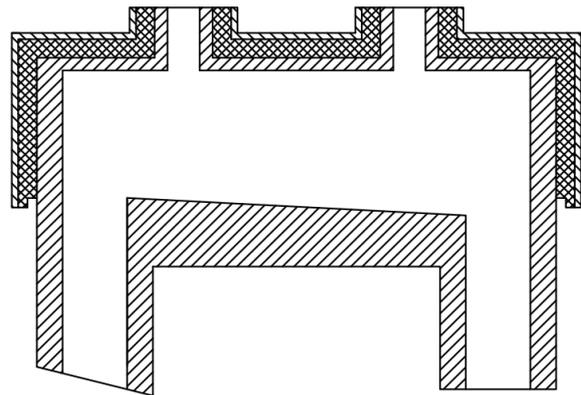
**For citation:** Murashov V.A., Strogonov K.V., Borisov A.A., Lvov D.D. Steel degassing in continuous steel melting units. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 140–147. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4154

## Введение

Выпуск стали увеличивается из года в год. Так, по статистике World Steel Association (WSA), за последние 20 лет (с 2000 по 2021 гг.) средний мировой прирост составил более 4 %. Всё это связано с непрерывным ростом индустриализации и населения нашей планеты. При этом по прогнозам экспертов спрос на сталь в 2023 г. вырастет на 2,2 % и достигнет 1 881,4 млн т [1]. Всё это сопутствует ежегодному росту цен на топливо и высоким выбросам вредных веществ в окружающую среду около 1,5 т/т стали, большую часть из которых составляют выбросы CO<sub>2</sub>, высокая концентрация которого является одним из основных факторов повышения средней температуры поверхности Земли [2–5]. Именно поэтому ключевым вектором развития в соответствии с хартией WSA является «Proactively address climate change and take effective actions to minimize the industry’s GHG emissions», направленный на уменьшение эмиссии диоксида углерода и снижение потребления энергетических ресурсов при производстве стали [1].

Этого можно достичь переходом с традиционных ковшевых технологий на сталеплавильный агрегат непрерывного действия (САНД) [6–8]. Но переход на непрерывный процесс производства стали потребует и новых технологических решений по её вакуумированию, ведь процесс дегазации повышает качество стальной продукции и крайне важен и необходим при производстве легированных и особо прочных сталей [9–12]. При этом переход на непрерывное вакуумирование позволит, в сравне-

нии с действующими технологиями, минимизировать потери энергии и, как следствие, снизить расход топлива и количество вредных выбросов при прогреве и поддержании температуры вакуумной камеры в период технологического простоя, которые длятся порядка 48 и 2 часов соответственно и характерны для вакууматоров периодического действия [13].



**Рис. 1.** Эскиз непрерывной дегазационной установки  
**Fig. 1.** Sketch of a continuous degassing unit

Научная новизна работы заключается в исследовании непрерывной дегазации расплава стали при создании разрежения (вакуума) для вакууматора П-образного типа [6] (рис. 1) аналитическими методами. Их практическая значимость направлена на обеспечение снижения удельных энергетических

затрат и выбросов вредных веществ в процессе вакуумирования, а также на улучшение показателей стойкости футеровки за счёт значительного сокращения числа теплоперепадов [14].

### Материалы и методы

#### Определение скорости осветления и времени всплытия пузырька

Диаметр пузырька и его форма в значительной степени влияют на скорость всплытия и коэффициент сопротивления газовых включений, поэтому в первом приближении, в соответствии с работами [15–17], предположим, что для всплывающего пузырька характерен ламинарный или стоковый режим всплытия.

Уравнение, определяющее скорость всплытия свободного воздушного пузыря в зависимости от его радиуса в различных жидкостях в соответствии с работами [18, 19]:

$$U = 2\alpha g \rho R^2 / 9\mu, \quad (1)$$

где  $\alpha=1$  (при теоретическом выводе) – числовая константа;  $\rho=7000 \text{ кг/м}^3$  – плотность расплава стали при  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $R$  – радиус газового пузырька;  $\mu = 0,0064 \text{ Па}\cdot\text{с}$  – вязкость расплава стали.

Учтём влияние вакуума на размер газовой фракции. Создание разрежения над расплавом положительно скажется на времени дегазации, увеличив скорость всплытия газового пузырька. Получим следующую зависимость диаметра от разрежения:

$$D = D_0 \cdot \sqrt[3]{P_0 / (P_{\text{абс}})}, \quad (2)$$

где  $D_0=0,001 \text{ м}$  – характерный диаметр пузырька;  $P_0=101,3 \text{ кПа}$  – атмосферное давление над расплавом;  $P_{\text{абс}} = P_0 - \Delta P$  – абсолютное давление над поверхностью расплава.

Из уравнения (1) с учётом уравнения (2) получим зависимость скорости всплытия пузырька от абсолютного давления над расплавом:

$$U = 2g\rho(R_0 \cdot \sqrt[3]{P_0 / (P_{\text{абс}})})^2 / 9\mu. \quad (3)$$

На рис. 2 приведён график зависимости скорости дегазации расплава при различных давлениях над расплавом. Расчётные данные показывают резкий рост скорости газового пузырька при достижении вакуума. Это позволяет уменьшить время, затрачиваемое на дегазацию расплава, увеличить производительность вакууматора и снизить тепловые потери, тем самым уменьшив удельные затраты энергоресурсов.

Но формула (1) справедлива для ламинарного всплытия и малых чисел  $Re$ . Так, при давлении над расплавом в  $1,3 \text{ кПа}$ , в соответствии с выражением (3) и рис. 2, скорость всплытия пузырька составит около  $11 \text{ м/с}$ , а число  $Re=12000$  (4), что не соответствует ламинарному режиму всплытия.

$$Re = \rho U D / \mu \quad (4)$$

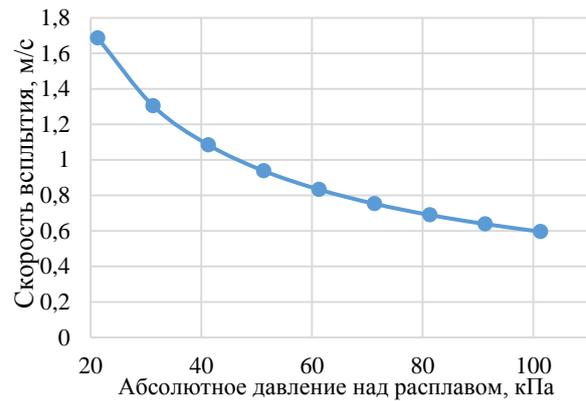


Рис. 2. График зависимости скорости дегазации расплава от давления над поверхностью расплава

Fig. 2. Graph of dependence of melt degassing rate on pressure above the melt surface

Следовательно, для турбулентного потока можно применить уравнение И.Г. Маленкова [17], тогда скорость всплытия пузырька газа:

$$U = \alpha \left( \beta \frac{2\sigma}{D \cdot \rho} + \frac{g \cdot D}{2} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где  $\alpha, \beta=1$  (при теоретическом выводе) – числовые константы.

С учётом выражения (2) получим график зависимости скорости всплытия пузырька от давления над расплавом (рис. 3).

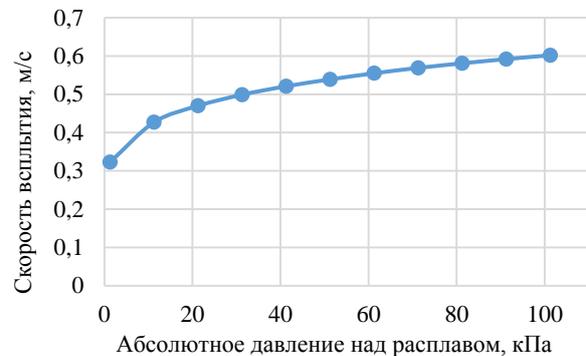


Рис. 3. График зависимости скорости всплытия пузырька от давления над поверхностью расплава

Fig. 3. Graph of a bubble resurfacing rate dependence on the pressure above the melt surface

Из графика следует, что с увеличением вакуума над поверхностью расплава в вакууматоре (увеличением диаметра пузырька) при определённых размерах газового пузырька скорость его всплытия уменьшается и при абсолютном давлении в  $1,3 \text{ кПа}$  составляет  $0,3 \text{ м/с}$ , что соответствует результатам, полученным в работах [19, 20].

Исходя из скорости пузырька время его всплытия можно определить по следующей формуле:

$$\tau = h/U,$$

где  $h$  – высота слоя расплава, равна 0,4 м.

Таким образом, с учётом скорости всплытия пузырька (5) время всплытия рассчитывается по формуле (6) и при абсолютном давлении над расплавом в 1,3 кПа составляет 1,2 с.

$$\tau = h / \left( \alpha \left( \beta \frac{2\sigma}{(D_0 \cdot \sqrt[3]{P_{абс}}) \cdot \rho} + \frac{g \cdot (D_0 \cdot \sqrt[3]{P_{абс}})}{2} \right)^{1/2} \right). \quad (6)$$

Однако в соответствии с работами [20, 21] время всплытия пузырька газа не является определяющим. И в процессе диффузии пузырька водорода выделяют три стадии:

- диффузию атомов растворенного в металле газа к поверхности дегазации;
- образование молекул газа, адсорбированных на поверхности дегазации;
- десорбцию молекул газа с поверхности дегазации в газовую фазу.

Исходя из этого можно сделать вывод, что скорость удаления газовых включений зависит от концентрации водорода, а следовательно, она изменяется в процессе вакуумирования.

Время процесса дегазации, необходимое для достижения содержания водорода в заданных пределах, определяется по формуле [19–22]:

$$\tau = -\frac{1}{k_H} \cdot \ln \left( \frac{[\%H_K] - [\%H_{равн}]}{[\%H_Н] - [\%H_{равн}]} \right), \quad (7)$$

где  $k_H = 0,13 \text{ мин}^{-1}$  – константа скорости удаления водорода;  $[\%H_K] = 1,5 \text{ ppm}$  – конечная концентрация водорода;  $[\%H_Н] = 6 \text{ ppm}$  – начальная концентрация водорода;  $[\%H_{равн}] = 0,8 \text{ ppm}$  – равновесная концентрация водорода (таблица).

С учётом подстановки и времени всплытия пузырька получим время вакуумирования расплава стали  $\tau \approx 15,5$  минут.

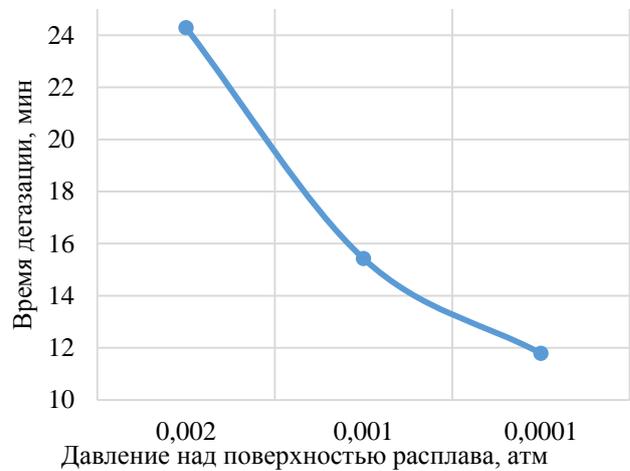
**Таблица.** Равновесное содержание водорода при различных давлениях

**Table.** Equilibrium hydrogen content at various pressures

Параметр/Parameter	Значение/Value			
$p_{H_2}$ , атм/atm	1,0	0,1	0,01	0,001
[H], ppm	25,6	8,1	2,6	0,8

На основе уравнения (7) и таблицы получим график зависимости времени дегазации расплава

стали от давления на поверхности расплава в вакуум-камере (рис. 4).



**Рис. 4.** График зависимости времени дегазации от давления над поверхностью расплава

**Fig. 4.** Dependence of degassing time on pressure above the melt surface

Исходя из полученного графика можно сделать вывод, что с увеличением разрежения над поверхностью расплава в дегазационной установке, несмотря на уменьшение скорости всплытия пузырька (рис. 3), время вакуумирования расплава стали уменьшается, так как уменьшается равновесное содержание водорода.

## Результаты

### Определение габаритов вакуум-камеры

Зная время всплытия  $\tau = 15,5$  минут, можно определить длину вакуум-камеры П-образного типа:

$$L = \frac{G}{b \cdot h \cdot \rho} \cdot \tau,$$

где  $G = 9,722 \text{ кг/с}$  – массовый расход расплава (производительность печи);  $b = 1,5 \text{ м}$  – ширина вакууматора (равна ширине печи [15]).

С учётом подстановки получим длину вакууматора  $L = 2,15 \text{ м}$ , которая равна габаритным характеристикам действующих вакууматоров РН-типа [23–25].

Создание разрежения над поверхностью расплава в вакууматоре требует уравнивания давлений в плоскости на поверхности расплава в плавильной камере, для чего необходимо создать давление столбом расплава, что ведёт к удлинению патрубка для подачи расплава в дегазационную камеру. Необходимость этого связана с требованиями по сохранению скорости движения жидкой стали внутри вакууматора, равной скорости движения внутри САНД. Высота патрубков определяется исходя из формул

(8), (9), равна  $H=1,5$  м и сопоставима с габаритами циркуляционных вакууматоров [25].

$$p_{\text{атм}} = \rho \cdot g \cdot H + (P_{\text{абс}}), \quad (8)$$

$$H = \Delta p \cdot 1000 / \rho g. \quad (9)$$

#### Определение энергетического эффекта

Исходя из температурного графика работы вакууматора периодического действия (рис. 5) и данных, описанных в работах [13, 25], следует, что перед началом процесса вакуумирования проводят обязательный прогрев дегазационной установки до температуры 1100...1150 °С, процесс которого занимает порядка 48 часов, затем идёт процесс вакуумирования, длящийся от 30 минут до 2 часов [26], и после завершения дегазации на протяжении 2 ч и более поддерживается температура внутри вакууматора, что обуславливается технологическими процессами, в ожидании следующего ковша.

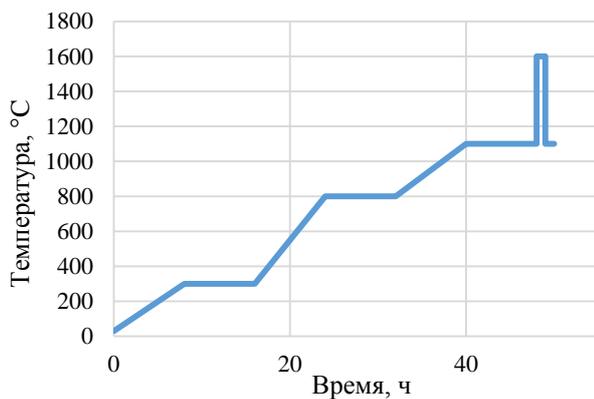


Рис. 5. Температурный график работы вакууматора RH-типа

Fig. 5. Temperature graph of a RH-type degasser operation

При подогреве вакууматора в период простоя природным газом его часовой расход составляет примерно 140 м<sup>3</sup>/ч. Объем сталеплавильного ковша 354 т. Теплотворная способность природного газа 33,5 МДж/м<sup>3</sup>. Таким образом, на подогрев вакууматора в период простоя, без учёта предварительного прогрева, в пересчёте на тонну стали расходуется 0,8 м<sup>3</sup> газа, или 26,5 МДж тепловой энергии, которые фактически являются потерями в окружающую среду. Следовательно, переход на непрерывное ва-

куумирование стали позволит сократить затраты энергии на 26,5 МДж/т.

#### Заключение

Выпуск стали, в том числе и вакуумированной, ежегодного увеличивается, при этом перед производителями стоит задача минимизации издержек, чего можно достичь уменьшением потерь и, как следствие, уменьшением расхода энергетических ресурсов. Одним из способов снижения энергопотребления является переход на непрерывный процесс производства стали, в том числе и в области вакуумирования жидкой стали. В статье рассмотрена П-образная конструкция вакууматора непрерывного действия [6]. Получены зависимости, позволяющие определить влияние разрежения в вакуум-камере на скорость всплытия пузырька, время дегазации расплава и габаритные характеристики установки. При абсолютном давлении над расплавом в 1,3 кПа рассчитана скорость всплытия пузырька газа и время вакуумирования жидкого металла, которые равны, соответственно, 0,3 м/с и 15,5 минутам. Для заданных условий определены габариты вакуум-камеры, длина вакуум-камеры равна 2,15 м, высота патрубков 1,5 м, которые сопоставимы с представленными на рынке RH-вакууматорами при схожих производительности и качестве готовой продукции [23]. Проведена оценка энергетических затрат – так, переход на непрерывное вакуумирование позволяет сократить затраты энергии на подогрев вакуум-камеры в момент технологического простоя на 26,5 МДж на тонну стали, или на 0,8 м<sup>3</sup>/т. Таким образом, исследуемые меры могут привести к удельному сокращению тепловых потерь в окружающую среду и повышению эффективности производства за счёт сокращения энергозатрат на процесс подогрева вакууматора в период технологического простоя. Помимо этого, переход на непрерывный процесс дегазации позволит снизить число ремонтных интервалов, так как в значительной степени снижается число тепловых перепадов [14, 27], а следовательно, снизить затраты на проведение ремонтных работ и увеличить время работы оборудования. Переход на САНД позволит сократить тепловые потери в период транспортировки расплава между плавильным цехом и зоной вакуумирования [24, 28, 29].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Steel in Figures 2022. URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/> (дата обращения: 21.01.2023).
2. Comparative evaluation of energy efficiency and GHG emissions for alternate iron-and steelmaking process technologies / Y. Gordon, S. Kumar, M. Freislich, Yu. Yaroshenko // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2014. – Ч. 1. – С. 50–59.
3. The rise in global atmospheric CO<sub>2</sub>, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers / B. Ekwurzel, J. Boneham, M. Dalton, R. Heede, R. Mera, M. Allen, P. Frumhoff // Climatic Change. – 2017. – V. 144. – № 4. – P. 579–590.

4. Vogl V., Åhman M., Nilsson L.J. The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase // *Climate Policy*. – 2021. – Vol. 21. – № 1. – P. 78–92.
5. Fan Z., Friedmann S.J. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy // *Joule*. – 2021. – Vol. 5. – № 4. – P. 829–862.
6. Иванцов Г.П., Василивицкий А.В., Смирнов В.И. Непрерывный сталеплавильный процесс. – М.: Металлургия, 1967. – 147 с.
7. Агрегат непрерывного получения стали: пат. Рос. Федерация № 2760199; заявл. 30.12.2020; опубл. 22.11.2021, Бюл. № 33.
8. Continuous steelmaking unit of bubbling type / K. Strogonov, L. Kornilova, A. Popov, A. Zdarov // *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Energy and Power Engineering 2021*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. – P. 63–72.
9. Керимов Р.И. Опыт внедрения физических методов при внепечной обработке электростали // *Технология машиностроения и материаловедение*. – 2019. – № 3. – С. 73–82.
10. Мирзаянова С.Б., Юсупходжаев А.А. Исследование возможности повышения качества выплавляемой стали процессом вакуумирования // *Science Time*. – 2019. – № 5 (65). – С. 68–72.
11. Influence of steel vacuuming on the reduction of hydrogen content / M. Radu, S. Serban, E. Popa, T. Neput // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. – Vol. 1426. – № 1. – P. 012052.
12. Improving shipbuilding steel grade quality at stages of smelting, secondary refining, and continuous casting / P. Kovalev, S. Riaboshuk, A. Issagulov, S. Kvon, V. Kulikov // *Metals*. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 203.
13. Заболотский А.В., Аксельрод Л.М., Овсянников В.Г. Объемное моделирование термических напряжений в футеровке циркуляционного вакууматора // *Сталь*. – 2014. – № 12. – С. 10–14.
14. Протасов А.В. Отечественные разработки оборудования и технологии поточного вакуумирования стали в процессе непрерывной разливки // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020. – Т. 76. – № 10. – С. 1004–1012.
15. Разработка энергоэффективной печи барботажного типа / В.А. Мурашов, А.А. Борисов, А.С. Попов, К.С. Строгонов // *Технологии будущего* – М.: ИД МЭИ, 2022. – С. 284–289.
16. Strogonov K.V., Zdarov A.A. Energy saving of high-temperature processes by intensive melt degassing // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. – 2020. – Vol. 1683. – № 5. – P. 052029.
17. Development of a degassing plant for a promising melting reactor for basalt / K. Strogonov, L. Kornilova, A. Popov, A. Zdarov // *Proceedings of ICEPP 2021* / ed. by Y. Vankov. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – Vol. 190. – P. 142–150.
18. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959. – 700 с.
19. Чанцев В.Ю. Определение параметров воздушно-пузырькового барботажа в воде // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2017. – № 1. – С. 39–45.
20. К вопросу удаления водорода из металла в вакууматоре циркуляционного типа / А.А. Метелкин, О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов, О.И. Шевченко, А.Ю. Корогодский // *Теория и технология металлургического производства*. – 2016. – № 1 (18). – С. 29–33.
21. Корнеев С.В. Современные подходы к удалению водорода из стали // *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. – Минск: БНТУ, 2018. – № 39. – С. 3–11.
22. Селиванов В.Н., Буданов Б.А., Аланкин Д.В. Кинетическая модель удаления водорода при циркуляционном вакуумировании стали // *ТитМПИ*. – 2013. – № 1 (13). – С. 31–33.
23. Бигеев В.А., Столяров А.М., Валиахметов А.Х. Металлургические технологии в высокопроизводительном электросталеплавильном цехе. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 320 с.
24. Морозов А.П., Агапитов Е.Б. Интенсификация комплексной обработки стали при циркуляционном вакуумировании с плазменным нагревом: монография. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – 139 с.
25. Ковязин И.В. Исследование технологических параметров циркуляционного вакууматора с целью совершенствования конструкции вакуум-камеры: магистерская диссертация. – Нижний Тагил, 2021. – 82 с.
26. Operation method of ladle refining treatment: U.S. Patent Application No. 17/756,478, 2023.
27. Numerical simulation of thermal insulation and longevity performance in new lightweight ladle / Y. Sun, J. Tian, D. Jiang, B. Tao, Y. Liu, J. Yun, D. Chen // *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. – 2020. – Vol. 32. – № 22. – P. e5830.
28. Некоторые особенности производства If-сталей / М.В. Зарецкий, П.С. Власова, А.В. Федянин, А.А. Кошкаров // *Технологии Металлургии, Машиностроения и Материалобработки*. – 2020. – № 19. – С. 80–88.
29. Lin C.S. Analysis of temperature dropping of molten steel in ladle for steelmaking // *China Steel Technical Report*. – 2022. – № 35. – P. 7–12.

### Информация об авторах

**Вячеслав Андреевич Мурашов**, студент Национального исследовательского университета «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14/1. MurashovViacA@mpei.ru; <http://orcid.org/0009-0007-9576-8539>

**Константин Владимирович Строгонов**, кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей Национального исследовательского университета «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14/1. StrogonovKV@mpei.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3276-4403>

**Андрей Александрович Борисов**, аспирант, Государственный университет просвещения, Россия, 141014, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 24. Andreyborisov1998@mail.ru

**Дмитрий Дмитриевич Львов**, аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14/1. LvovDD@mpei.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3808-2094>

Поступила в редакцию: 31.03.2023

Поступила после рецензирования: 01.06.2023

Принята к публикации: 13.12.2023

## REFERENCES

1. *World Steel in Figures 2022*. Available at: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022> (accessed: 21 January 2023).
2. Gordon Y., Kumar S., Freislich M., Yaroshenko Yu. Comparative evaluation of energy efficiency and GHG emissions for alternate iron-and steelmaking process technologies. *Creative legacy of V.E. Grum-Grzhimailo: history, modern state, future*. Ekaterinburg, 2014, pp. 50-59. (In Russ.)
3. Ekwurzel B., Boneham J., Dalton M., Heede R., Mera R., Allen M., Frumhoff P. The rise in global atmospheric CO<sub>2</sub>, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers. *Climatic Change*, 2017, vol. 144, no. 4, pp. 579–590.
4. Vogl V., Åhman M., Nilsson L. J. The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase. *Climate Policy*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 78–92.
5. Fan Z., Friedmann S. J. Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 829–862.
6. Ivantsov G.P., Vasilivitskii A.V., Smirnov V.I. *Continuous steelmaking*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 147 p. (In Russ.)
7. Strogonov K.V., Kornilova L.V. *Continuous steel production unit*. Patent RF, no. 2760199, 2021. (In Russ.)
8. Strogonov K., Kornilova L., Popov A., Zdarov A. Continuous steelmaking unit of bubbling type. *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Energy and Power Engineering 2021*. Singapore, Springer Nature, 2022. pp. 63–72.
9. Kerimov R.I. Experience in implementation of physical methods in out-of-furnace processing of electric steel. *Engineering technology and materials science*, 2019, no. 3, pp. 73–82. (In Russ.)
10. Mirzazhanov S.B., Yusupkhodzhaev A.A. Study of the possibility of increasing sold steel quality by the vacuum process. *Science Time*, 2019, no. 5 (65), pp. 68–72. (In Russ.)
11. Radu M., Serban S., Popa E., Heput T. Influence of steel vacuuming on the reduction of hydrogen content. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2020, vol. 1426, no. 1, pp. 012052.
12. Kovalev P., Riaboshuk S., Issagulov A., Kvon S., Kulikov V. Improving shipbuilding steel grade quality at stages of smelting, secondary refining, and continuous casting. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 203.
13. Zabolotsky A.V., Axelrod L.M., Ovsyannikov V.G. Volumetric modeling of thermal stresses in the lining of a circulating degasser. *Steel*, 2014, no. 12, pp. 10–14. (In Russ.)
14. Protasov A.V. Domestic developments of equipment and technology for in-line vacuum degassing of steel in the process of continuous casting. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*, 2020, vol. 76, no. 10, pp. 1004–1012. (In Russ.)
15. Murashov V.A., Borisov A.A., Popov A.S., Strogonov K.S. Development of energy efficient bubble furnace. *Technologies of the future*. Moscow, MPEI Publ. house, 2022. pp. 284–289. (In Russ.)
16. Strogonov K.V., Zdarov A.A. Energy saving of high-temperature processes by intensive melt degassing. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2020, vol. 1683, no. 5, pp. 052029.
17. Strogonov K., Kornilova L., Popov A., Zdarov A. Development of a degassing plant for a promising melting reactor for basalt. *Proceedings of ICEPP 2021*. Ed. by Y. Vankov. Cham, Springer International Publ., 2022. Vol. 190, pp. 142–150.
18. Levich V.G. *Physical and chemical hydrodynamics*. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959. 700 p. (In Russ.)
19. Chantsev V.Yu. Determination of the parameters of air-bubble bubbling in water. *Problems of the Arctic and Antarctic*, 2017, no. 1, pp. 39–45. (In Russ.)
20. Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Shevchenko O.I., Korogodsky A.Yu. On the issue of removing hydrogen from metal in a circulating degasser. *Theory and technology of metallurgical production*, 2016, no. 1 (18), pp. 29–33. (In Russ.)
21. Korneev S.V. Modern approaches to the removal of hydrogen from steel. *Metallurgiya: respublikanskii mezhdomstvennyy sbornik nauchnykh trudov*, 2018, no. 39, pp. 3–11. (In Russ.)
22. Selivanov V.N., Budanov B.A., Alankin D.V. Kinetic model of hydrogen removal during circulating degassing of steel. *TiTMP*, 2013, no. 1 (13), pp. 31–33. (In Russ.)
23. Bigeev V.A., Stolyarov A.M., Valiakhmetov A.Kh. *Metallurgical technologies in a high-performance electric steel-smelting shop*. Moscow; Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2020. 320 p. (In Russ.)
24. Morozov A.P., Agapitov E.B. *Intensification of the complex treatment of steel during circulation degassing with plasma heating*. Magnitogorsk, MGTU Publ., 2003. 139 p. (In Russ.)
25. Kovyazin I.V. *Study of the technological parameters of the circulation degasser in order to improve the design of the vacuum chamber*. Master Diss. Nizhny Tagil, 2021. 82 p. (In Russ.)
26. Hirakawa K., Hirata K., Shimoda I., Yamauchi T., Uehara H. *Operation method of ladle refining treatment*. U.S. Patent Application No. 17/756,478, 2023.
27. Sun Y., Tian J., Jiang D., Tao B., Liu Y., Yun J., Chen D. Numerical simulation of thermal insulation and longevity performance in new lightweight ladle. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2020, vol. 32, no. 22, pp. e5830.
28. Zaretsky M.V., Vlasova P.S., Fedyanin A.V., Koshkarov A.A. Some features of production of if-steels. *Tekhnologii Metallurgii, Mashinostroeniya i Materialoobrabotki*, 2020, no. 19, pp. 80–88. (In Russ.)
29. Lin C.S. Analysis of temperature dropping of molten steel in ladle for steelmaking. *China Steel Technical Report*, 2022, no. 35, pp. 7–12.

### Information about the authors

**Viacheslav A. Murashov**, Student, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation. MurashovViacA@mpei.ru; <http://orcid.org/0009-0007-9576-8539>

**Konstantin V. Strogonov**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation. StrogonovKV@mpei.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3276-4403>

**Andrey A. Borisov**, Postgraduate Student, State University of Education, 24, Vera Voloshina street, Mytishchi, 141014, Russian Federation. Andreyborisov1998@mail.ru

**Dmitry D. Lvov**, Postgraduate Student, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation. LvovDD@mpei.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3808-2094>

Received: 31.03.2023

Revised: 01.06.2023

Accepted: 13.12.2023