

В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

IN THE ORDER OF DISCUSSION



УДК 62-932.2

DOI 10.17073/0368-0797-2025-1-98-105

Оригинальная статья  
Original article

## РАЗРАБОТКА АГРЕГАТА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ\*

В. А. Мурашов<sup>✉</sup>, К. В. Строгонов, А. К. Бастынец, Д. Д. Львов

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14)

✉ MurashovViacA@mpei.ru

**Аннотация.** Рост потребления качественной стали диктует необходимость увеличения количества стали, проходящей процесс вакуумирования, так как обработка стального расплава под вакуумом улучшает ее свойства за счет уменьшения в ней газовых и неметаллических включений. Однако рост цен на топливо и стремление к переходу на безуглеродную металлургию требуют снижения энергоемкости и, как следствие, сокращения потребления энергоресурсов. Достичь этого можно переходом на непрерывное производство, сокращая период технологического простоя высокотемпературного оборудования, температура которого должна поддерживаться для увеличения срока службы футеровки и повышения качества конечного продукта. Однако для перехода на непрерывное сталеплавильное производство требуется разработка ряда новых технологических узлов, способных функционировать в рамках сталеплавильного агрегата непрерывного действия, в том числе и агрегата внепечной обработки расплава. Целью работы является разработка теоретических основ для узла внепечной обработки стального расплава, включающего в себя вакууматор непрерывного действия. В работе представлен узел внепечной обработки стального расплава с вакууматором непрерывного действия II-образного типа, являющийся частью агрегата непрерывного жидкофазного восстановления железа производительностью 10 т/ч для получения стали Ст3. Изучено влияние остаточного давления в вакуум-камере на скорость дегазации и время всплытия пузырька газа. Габариты вакууматора определены с учетом производительности агрегата восстановления железа. Авторы произвели подбор многослойной футеровки, а также провели оценку потерь в окружающую среду с учетом конвективного и лучистого теплообмена.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, непрерывное вакуумирование, сталь, расплав, разрезание, сталеплавильный агрегат непрерывного действия, внепечная обработка, внедомненное восстановление железа

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00421, <https://rscf.ru/project/24-29-00421>.

**Для цитирования:** Мурашов В.А., Строгонов К.В., Бастынец А.К., Львов Д.Д. Разработка агрегата внепечной обработки стали непрерывного действия. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(1):98–105. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-1-98-105>

## DEVELOPMENT OF A CONTINUOUS EXTRA-FURNACE STEEL PROCESSING UNIT

V. A. Murashov<sup>✉</sup>, K. V. Strogonov, A. K. Bastynets, D. D. Lvov

Moscow Power Engineering Institute (14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow 111250, Russian Federation)

✉ MurashovViacA@mpei.ru

**Abstract.** The increase in consumption of high-quality steel dictates the need for more steel undergoing the vacuum process, since processing the steel melt under vacuum improves its properties by reducing gas and non-metallic inclusions in it. However, rising fuel prices and the desire to transition to carbon-free metallurgy require the industry to reduce energy intensity and, as a consequence, reduce energy consumption. This can be achieved by switching to continuous production, reducing the period of technological downtime of high-temperature equipment, the temperature of which must be maintained to increase the lining service life and improve the final product quality. But the transition to continuous steelmaking requires the development of a number of new technological units capable of functioning within the framework of the continuous steelmaking unit, including the extra-furnace processing unit for the melt. The propose of the work was development of a theoretical basis for extra-furnace processing unit of molten steel with a continuous degasser. A unit for extra-furnace processing of steel melt with a continuous U-shaped vacuum degasser is presented, which is part of a unit for continuous liquid-phase iron reduction with a capacity of 10 tons per hour for production of St3 steel. The authors studied the influence of residual pressure in a vacuum chamber on the rate of degassing and the time of a gas bubble ascent. Dimensions of the vacuum degasser were determined taking into account the productivity of the iron reduction unit. A multilayer lining was selected, and losses to the environment were assessed, taking into account convective and radiant heat transfer.

\* В связи с наличием различных мнений рецензентов, как отрицательных, так и положительных, главным редактором принято решение опубликовать эту статью как дискуссионную.

**Keywords:** energy efficiency, continuous degassing, steel, melt, vacuum, continuous steel making unit, extra-furnace processing, nonblast-furnace iron reduction

**Acknowledgements:** The research was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 24-29-00421, <https://rscf.ru/project/24-29-0042>.

**For citation:** Murashov V.A., Strogonov K.V., Bastynets A.K., Lvov D.D. Development of a continuous extra-furnace steel processing unit. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(1):98–105. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-1-98-105>

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный рост индустриализации и населения планеты приводит к росту потребления стали. За последние 22 года (с 2000 по 2022) мировой выпуск стали в среднем ежегодно увеличивается на 4%. И, не смотря на сокращение общемирового производства стали в 2023 г., в России оно выросло на 5,6%. При этом объем общемирового выпуска стали в 2023 г. составил 1888 млн т<sup>1</sup>. С увеличением производства увеличиваются и расход топлива, и выбросы в окружающую среду, в частности выбросы парниковых газов, например, CO<sub>2</sub>. Высокая концентрация последнего является одним из факторов повышения средней температуры на поверхности земли [1; 2]. Поэтому важно снижать энергоемкость стальной продукции, в том числе и за счет повышения энергоэффективности производства стали.

Переход на непрерывные процессы производства, в частности САНД (сталеплавильный агрегат непрерывного действия), позволит снизить удельные энергозатраты и выбросы вредных веществ в окружающую среду в сравнении с традиционными технологиями производства стали [3 – 5]. Однако переход на непрерывные процессы требует разработки новых узлов и агрегатов, способных работать безостановочно, в том числе и агрегатов внепечной обработки стального расплава.

Под внепечной обработкой стали подразумевается ряд технологических операций по получению жидкой стали необходимого качества, осуществляемый в традиционной металлургии вне сталеплавильного агрегата. Данные процессы проходят вне основного агрегата, увеличивая производительность всей технологической цепочки.

Внепечная обработка стали позволяет улучшить качество стали, в частности его механические свойства, коррозионную стойкость и другие показатели, тем самым получить более качественную продукцию, что крайне важно и необходимо при производстве высококачественных сталей [6; 7].

Научная новизна работы заключается в разработке агрегата внепечной обработки расплава, работающего в рамках САНД и включающего в себя зону подачи легирующих и вакууматор непрерывного действия

П-образного типа [3], и в определении времени всплытия пузырька аналитическими и расчетными методами. Практическая значимость направлена на снижение энергоемкости стали при ее внепечной обработке, в частности в процессе вакуумирования, улучшения показателей стойкости футеровки за счет сокращения числа теплоперепадов, связанных с технологическим простым оборудования [8], и сокращения выбросов вредных веществ за счет снижения выхода отходящих газов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом разработки является зона внепечной обработки стального расплава, работающая в рамках САНД производительностью 10 т/ч стали. Она включает в себя два основных участка: зону раскисления и легирования и зону вакуумирования.

Процессы раскисления и легирования необходимы для получения стали требуемого состава и качества с необходимыми прочностными свойствами. Для этого в ходе внепечной обработки могут подаваться элементы в порядке от слабо окисляющихся к сильно окисляющимся, т. е. с учетом сродства элемента к кислороду, что способствует снижению их угара. Так, например, угар для марганца может составлять 10 – 35 %, кремния – 15 – 25 %, алюминия – 60 – 90 %.

По агрегатному состоянию подающихся элементов легирование можно разделить на следующие категории: легирование твердыми ферросплавами; легирование жидкими ферросплавами; легирование экзотермическими ферросплавами.

Для определения перечня и количества элементов необходимо знать выпускаемый сортмент. Наиболее распространенным сортментом стали является Ст3, поэтому система для подачи легирующих будет разрабатываться под получение Ст3.

Согласно ГОСТ 380–2005 [9] Ст3 должна иметь следующий химический состав:

- углерод 0,14 – 0,22 %;
- марганец 0,40 – 0,65 %;
- кремний 0,15 – 0,30 %.

Поскольку разрабатываемый вакууматор будет непрерывного действия, то в качестве источника восстановленного железа может использоваться агрегат жидкофазного восстановления железа природным газом [10] с уменьшенной производительностью 10 т/ч, выбор которого обоснован существующим комплексом непрерывной разливки металла в лист валко-

<sup>1</sup> World Steel in Figures 2022. Available at URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/> (Accessed: 09.09.2024).

вым способом. Из реактора жидкофазного восстановления жидкий металл выходит, имея в своем составе 99,9 % железа [10]. Поэтому для получения Ст3 с учетом химического сродства элементов с кислородом предлагается следующая схема подачи ферросплавов: на первом этапе подача ферромарганца в струю жидкого металла, выходящего из агрегата восстановления, а затем подача ферросилиция в процессе вакуумирования. При этом, с учетом опыта легирования в традиционной металлургии и непрерывности процесса, добавки предполагается подавать в твердом порошкообразном виде в струе аргона под давлением, аналогично подаче кальция.

Протекающие реакции эндотермичны, поэтому для ускорения процесса дегазации расплава рекомендуется повысить температуру жидкой стали перед вакуумированием до температуры порядка 1600 °С за счет перегрева в реакторе восстановления или с помощью электродов, установленных в зоне подачи ферромарганца.

Определить количество необходимого легирующего компонента можно по формуле

$$G_l = \frac{100G_m(E_e - E_m)}{E_l(100 - U_e)}, \quad (1)$$

где  $G_l$  – массовый расход легирующего компонента, кг/с;  $G_m$  – массовый расход металла, кг/с;  $U_e$  – доля угара легирующих, %;  $E_e$ ,  $E_m$ ,  $E_l$  – доля легирующего компонента в конце процесса, в начале процесса, в легирующих соответственно.

Угар легирующих примем около 25 %, подавать предполагается ферромарганец ФМн78(Б) и ферросилиций ФС90.

После процессов раскисления и легирования сталь поступает в вакууматор непрерывного действия П-образного типа [11].

Для разрабатываемого агрегата было решено принять внутреннюю длину вакуум-камеры с учетом предполагаемых толщин футеровки и необходимости в пережиге в 1200 мм.

Исходя из производительности установки в 10 т/ч и длины вакуум-камеры, можно рассчитать ширину вакуум-камеры. Для это необходимо знать время дегазации расплава. Одним из факторов, определяющим время дегазации, является время всплытия пузырька, которое будет зависеть от скорости его всплытия и высоты слоя расплава. Скорость всплытия пузырька при стоковом режиме всплытия (число Рейнольдса  $Re < 1$ ) можно определить по формуле (2), при числах  $Re$  от 10 до 1000 она описывается уравнением Маленкова (3)

$$U = \frac{2\alpha g \rho R^2}{9\mu}; \quad (2)$$

$$U = \alpha \sqrt{\beta \frac{2\sigma}{D\rho} + \frac{gD}{2}}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – числовые константы, равные при теоретическом выводе единице;  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$  – плотность жидкого металла при 1400 °С;  $R$  – радиус газового пузырька;  $\mu = 0,0064 \text{ Па}\cdot\text{с}$  – вязкость расплава стали;  $D$  – диаметр газового пузырька;  $\sigma = 1,25$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Зададимся характерным диаметром пузырька, равным 1 мм.

Внутри вакуум-камеры создается вакуум, который скажется на габаритах всплывающего пузырька. Изменение диаметра в зависимости от разрежения над поверхностью расплава можно определить по формуле

$$D = D_0 \sqrt[3]{\frac{P_0}{P_{\text{абс}}}}, \quad (4)$$

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

Определив режим течения, можно рассчитать время всплытия пузырька с учетом высоты слоя расплава:

$$\tau = \frac{h}{U}, \quad (5)$$

где  $h = 0,4 \text{ м}$  – высота слоя расплава, принятая с учетом методических рекомендаций.

По данным работ [12; 13] в процессе вакуумирования можно выделить три стадии удаления пузырька: образование пузырьков газа; всплытие газовых пузырей; удаление пузырьков с поверхности расплава.

Время вакуумирования жидкого металла можно определить согласно уравнению [12 – 14]

$$\tau = -\frac{1}{K_H} \ln \left( \frac{[\% \text{ H}_K] - [\% \text{ H}_{\text{равн}}]}{[\% \text{ H}_H] - [\% \text{ H}_{\text{равн}}]} \right), \quad (6)$$

где  $K_H = 0,13 \text{ мин}^{-1}$  – константа скорости удаления водорода;  $[\% \text{ H}_K] = 1,5 \text{ ppm}$  – конечная концентрация водорода (принятая согласно промышленной практике);  $[\% \text{ H}_H] = 6 \text{ ppm}$  – начальная концентрация водорода (принятая с учетом литературных данных);  $[\% \text{ H}_{\text{равн}}] = 0,8 \text{ ppm}$  – равновесная концентрация водорода (табл. 1).

На рис. 1 представлен график зависимости времени процесса внепечной обработки расплава (вакуумирования) от абсолютного давления в вакуум-камере, график построен по уравнению (6) и данным табл. 1.

Определить ширину вакуум-камеры можно по формуле

$$b = \frac{G}{Lh\rho} \tau. \quad (7)$$

Чтобы обеспечить единую скорость течения расплава в вакууматоре и агрегате восстановления, следует

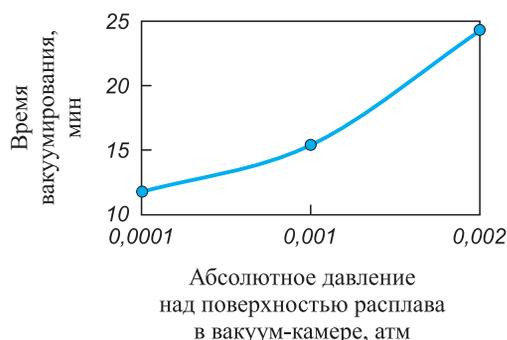


Рис. 1. Зависимость времени дегазации от давления над поверхностью расплава

Fig. 1. Dependence of degassing time on pressure above the melt surface

Таблица 1. Равновесное содержание водорода в зависимости от абсолютного давления в вакуум-камере

Table 1. Equilibrium hydrogen content depending on the absolute pressure in the vacuum chamber

$P_{H_2}$ , атм	1,0	0,1	0,01	0,001
[H], ppm	25,6	8,1	2,6	0,8

уравновесить давление в точках на одном уровне в зоне внепечной обработки расплава и на входе в подъемном патрубке вакуум-камеры, для чего необходимо создать в патрубке давление слоем расплава. С учетом этого высота патрубков должна быть порядка 1,3 м, что сопоставимо с габаритами циркуляционных вакууматоров [15].

Также следует оставить и запас между поверхностью расплава и свода, так как в процессе дегазации крупные пузыри могут уносить капли расплава и вредить футеровке свода.

Для удобства обслуживания и замены вакуум-камера должна быть быстроразъемным элементом узла внепечной обработки, а для подачи легирующих и инертного газа снабжена патрубками их подачи, встроенными в подъемный патрубок.

В случаях экстренной остановки сталеплавильного агрегата конструкция вакууматора должна обеспечить возможность легкого слива находящегося внутри

вакуум-камеры расплава, для чего под вакуум-камеры имеет наклон не менее 3°.

Для равномерного разрежения в вакууматоре предлагается наличие не менее двух патрубков, подключенных к системе создания вакуума.

Поскольку разрабатываемый вакууматор имеет относительно малую производительность порядка 10 т/ч, то наиболее эффективным является использование системы создания вакуума на основе механических насосов. Согласно работам [16; 17], при использовании механических насосов вместо парожеторных эксплуатационные затраты (условно-переменные издержки) сокращаются минимум на 80 %. При этом капитальные затраты для установок малой тоннажности остаются на том же уровне, что и для систем на парожеторных насосах.

Подбор теплоизоляционных материалов происходил с учетом рекомендаций справочника под авторством Кашеева И.Д. [18] и производителей футеровки<sup>2</sup>, а также чертежам действующих RH-вакууматоров.

В табл. 2 представлена конструкция элементов ограждения вакууматора: количество слоев, толщина слоя, материал слоя. Слои перечислены в порядке от внутренних к наружным.

Расчетная схема ограждающей конструкции в общем виде представлена на рис. 2.

С учетом рис. 2 интегральное уравнение, позволяющее определить удельный тепловой поток через ограждающую конструкцию, будет иметь следующий вид:

$$\frac{1}{\delta_0} \int_{t_1}^{t_{вн}} \lambda_0(t) dt = \frac{1}{\delta_1} \int_{t_2}^{t_1} \lambda_1(t) dt = \frac{1}{\delta_2} \int_{t_{нар}}^{t_2} \lambda_2(t) dt = \alpha_{сум} (t_{нар} - t_{ос}), \quad (8)$$

где  $\alpha_{сум}$  – суммарный коэффициент теплоотдачи с учетом конвективного и лучистого теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), определяемый формуле (9);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала футеровки, Вт/(м·°C),

<sup>2</sup> RHI Magnesita. The driving force of the refractory industry. Available at URL: <https://www.rhimagnesita.com/> (Accessed: 09.09.2024).

Таблица 2. Конструкция элементов ограждения вакууматора

Table 2. Design of vacuum degasser fencing elements

Элемент ограждения	Количество слоев	Характеристика слоев: материал – толщина (мм)		
		1	2	3
Свод	3	ПХПП – 150	ШЛ-1,0 – 100	ШВП-350 – 100
Стена	3	ПХПП – 250	ШЛ-1,0 – 100	ШВП-350 – 100
Под	1	ПХПП – 500	–	–

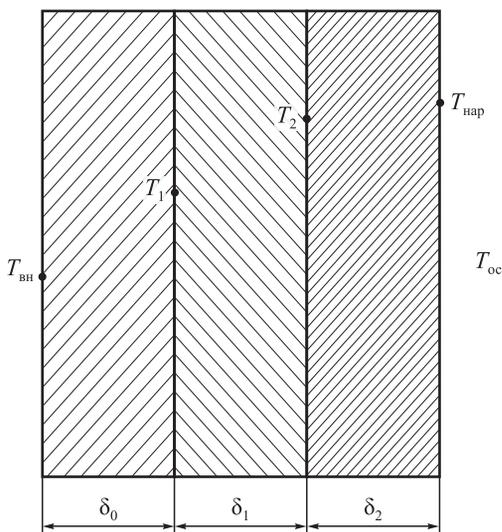


Рис. 2. Расчетная схема футеровки вакууматора:

$T_{вн}$ ,  $T_{нар}$  – температура на внутренней и наружной поверхности ограждения соответственно;  
 $T_{ос}$  – температура окружающей среды;  $T_1$  – температура между внутренним и средним слоем футеровки;  
 $T_2$  – температура между средним и наружным слоем футеровки;  
 $\delta_0$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – толщина внутреннего, среднего и наружного слоя футеровки

Fig. 2. Calculation of vacuum degasser lining:

$T_{вн}$ ,  $T_{нар}$  – temperature on the inner and outer surfaces of the fence, respectively;  
 $T_{ос}$  – ambient temperature;

$T_1$  – temperature between the inner and middle layer of the lining;  
 $T_2$  – temperature between the middle and outer layer of the lining;  
 $\delta_0$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – thickness of the inner, middle and outer layer of the lining

определяемый по (10);  $\delta$  – толщина слоя футеровки, м,  $t$  – температура, °С.

$$\alpha_{сум} = n_0 + n_1(t_{нар} - 20)^{n_2}; \quad (9)$$

$$\lambda = k_0 + k_1 t. \quad (10)$$

Коэффициенты для уравнений представлены в табл. 3, 4.

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Согласно формуле (1) для получения стали требуемого сортамента с учетом угара легирующих около 25 % необходимо будет добавлять:

- ферромарганца ФМн78(Б) – 11,5 кг/т;
- ферросилиция ФС90 – 2,9 кг/т.

Содержание в стали марганца составит 0,64 %, кремния – 0,25 %, что соответствует требованиям для Ст3 согласно ГОСТ [10].

Скорость всплытия пузырька по уравнениям (2) и (3) в зависимости от диаметра пузырька представлена на рис. 3.

Из графика следует, что критический диаметр пузырька газа, удовлетворяющего стоксовому всплы-

Таблица 3. Коэффициенты аппроксимации  $n_i$

Table 3. Approximation coefficients  $n_i$

Элемент ограждения	$n_0$	$n_1$	$n_2$
Свод	7,09	0,68	0,562
Боковая стена	7,20	0,56	0,592
Под	7,20	0,485	0,614

Таблица 4. Свойства материалов ограждения

Table 4. Properties of fencing materials

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
ПХПП	2,5
ШЛ-1,0	$0,35 + 35 \cdot 10^{-5}t$
ШВП-350	$0,115 + 9,6 \cdot 10^{-5}t$

тию, равен 0,1 мм, следовательно, скорость пузырька с характерным размером 1 мм описывается уравнением (3), подставив которое совместно с (4) в формулу (5), определим время всплытия пузырька, равное 1,3 с. Из этого можно сделать вывод о том, что скорость всплытия газового пузыря не является определяющим фактором при дегазации стали. Следовательно, согласно уравнению (6) и рис. 1, время дегазации жидкого металла составит около 15,5 мин.

Исходя из времени процесса и производительности в 10 т/ч по формуле (7) определим ширину вакуум-камеры, она составит 0,7 м.

Удельные тепловые потоки через разные части ограждающих конструкций, а также температура поверхности вакууматора, рассчитанные по формулам (8) – (10), представлены в табл. 5.

Полученные значения удельного теплового потока сопоставимы с показателями для действующих RH-вакууматоров с учетом радиационного теплообмена. Удельный тепловой поток с пода вакуум-камеры не

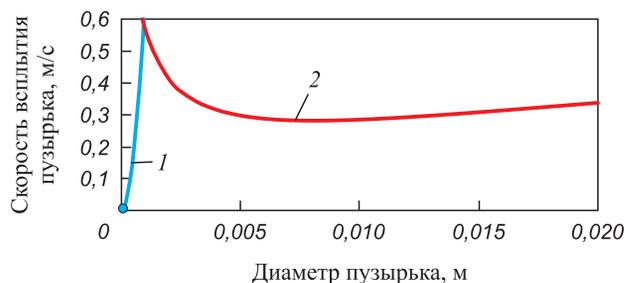


Рис. 3. Зависимость скорости всплытия пузырька от диаметра при различных режимах всплытия: 1 – стоксовый режим; 2 – формула Маленкова

Fig. 3. Dependence of bubble ascent velocity on diameter under different ascent modes: 1 – Stokes mode; 2 – Malenkov's equation

Таблица 5. Удельный тепловой поток для элементов ограждения

Table 5. Specific heat flux for fencing elements

Элемент ограждения	Удельный тепловой поток, кВт/м <sup>2</sup>	Температура наружной поверхности, °С
Свод	1662	122
Боковая стенка	1561	119

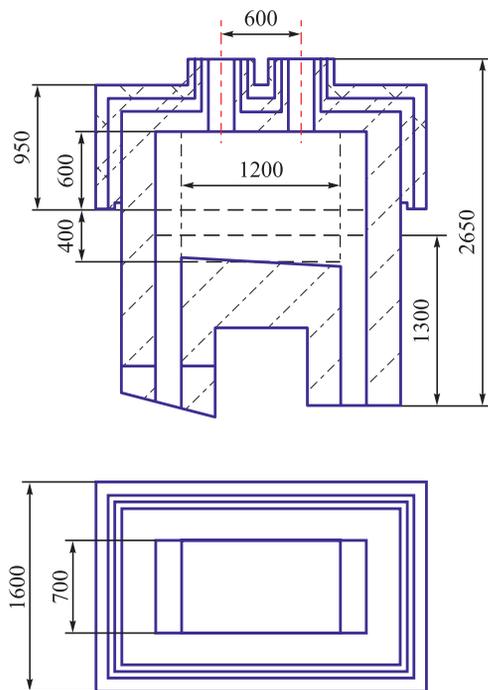


Рис. 4. Эскизный чертеж вакуум-камеры (разрез сбоку и вид снизу)

Fig. 4. Schematic drawing of a vacuum chamber (side cut and bottom view)

определялся, так как под вакуум-камеры напрямую не контактирует с окружающей средой.

Эскизный чертеж вакуум-камеры с учетом полученных ранее внутренних размеров и толщины футеровки представлен на рис. 4.

Согласно рис. 4, площадь наружной поверхности свода составит 3,6 м<sup>2</sup>, а площадь боковых стен, контактирующих с окружающей средой – 7,8 м<sup>2</sup>. Следовательно потери в окружающую среду составят около 18,2 кВт.

Эскизный чертеж агрегата внепечной обработки для непрерывной дегазации стального расплава представлен на рис. 5.

На эскизных чертежах предусмотрена система подачи легирующих в потоке аргона под давлением в струю расплава 1 и система продувки инертным газом в процессе вакуумирования 2.

### Выводы

С учетом ежегодного увеличения выпуска стали, в том числе и вакуумированной, перед сталелитейной промышленностью стоит задача по повышению эффективности производства и снижению затрат топлива. Переход на непрерывные процессы согласно источникам [19 – 21] позволяет снизить энергозатраты процессов и энергоемкость продукции.

В работе представлен агрегат внепечной обработки стали производительностью 10 т/ч расплава, включающий в себя вакууматор непрерывного действия П-образного типа. Для производства стали Ст3 проработан вопрос подачи легирующих: ферромарганец подается в виде порошка под давлением в струю расплава при переливе его из зоны восстановления железа в зону внепечной обработки, а ферросилиций – в вакууматор совместно с инертным газом для продувки. При этом расход легирующих при производстве стали Ст3 из жидкофазно восстановленного железа составит:

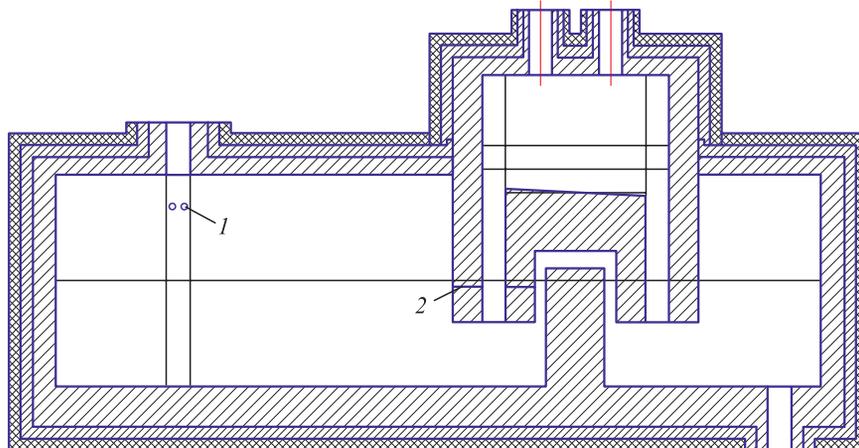


Рис. 5. Эскизный чертеж агрегата внепечной обработки расплава

Fig. 5. Schematic drawing of an extra-furnace melt processing unit

- ферромарганца ФМн78(Б) – 11,5 кг/т;
- ферросилиция ФС90 – 2,9 кг/т.

Вакуум в вакуум-камере предлагается создавать с помощью механических вакуумных насосов, так как в сравнении с парожеторной системой капитальные и эксплуатационные затраты, в том числе и затраты энергоресурсов, будут ниже.

Время дегазации расплава составит около 15,5 мин при высоте слоя расплава 0,4 м, ширине и длине внутренней части вакуум-камеры 0,7 и 1,2 м соответственно. Суммарные потери в окружающую среду через свод и боковые стенки с учетом многослойности футеровки будут равны 18,2 кВт, потери через под не учитываются, так как он не контактирует с окружающей средой. Температура наружной поверхности свода составит 122 °С, боковых стен – 119 °С.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. 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;144(4): 579–590. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1978-0>
2. Gordon Y., Kumar S., Freislich M., Yaroshenko Yu. Comparative evaluation of energy efficiency and GHG emissions for alternate iron-and steelmaking process technologies. *Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее*. Екатеринбург: Уральский федеральный университет; 2014;1:50–59.
3. Иванцов Г.П., Василивицкий А.В., Смирнов В.И. Непрерывный сталеплавильный процесс. Москва: Металлургия; 1967:147.
4. Strogonov K., Kornilova L., Popov A., Zdarov A. Continuous steelmaking unit of bubbling type. In: *Proceedings of the Int. Symp. on Sustainable Energy and Power Engineering 2021*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2022:63–72.
5. Strogonov K., Borisov A., Murashov V., Lvov D. Calculation of individual elements of enclosing structures of a continuous steelmaking unit. In: *5<sup>th</sup> Int. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. IEEE; 2023;(5):1–6.
6. De Paula Lopes B., de Castro J.A., Demuner L.M. A predictive model for hydrogen content in steel in non-degassed heats. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2021;18:e2519. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20212519>
7. Toirov O., Tursunov N., Alimukhamedov S., Kuchkorov L. Improvement of the out-of-furnace steel treatment for improving its mechanical properties. *E3S Web of Conferences*. 2023;(365):05002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336505002>
8. Протасов А.В. Отечественные разработки оборудования и технологии поточного вакуумирования стали в процессе непрерывной разливки. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2020;76(10):1004–1012. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-10-1004-1012>
9. Protasov A.V. Domestic developments of equipment and technologies of steel in-line degassing in the process of continuous casting. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;76(10): 1004–1012. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-10-1004-1012>
10. Строгонов К.В., Петелин А.Л., Терехова А.Ю., Львов Д.Д., Мурашов В.А., Борисов А.А. Жидкофазное восстановление железных руд углеродводородной смесью и водородом. *Промышленная энергетика*. 2023;(8):43–49. <https://doi.org/10.34831/EP.2023.43.83.006>
11. Пат. 2806948 RU. Агрегат непрерывного вакуумирования стали / Строгонов К.В., Мурашов В.А.; заявл. 05.04.2023; опубл. 08.11.2023. Бюл. № 31.
12. Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Шевченко О.И., Корогодский А.Ю. К вопросу удаления водорода из металла в вакууматоре циркуляционного типа. *Теория и технология металлургического производства*. 2016;(1(18)):29–33.
13. Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Shevchenko O.I., Korogodskii A.Yu. About hydrogen removal from metal in circular type degasser. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2016;(1(18)):29–33. (In Russ.).
14. Корнеев С.В. Современные подходы к удалению водорода из стали. *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. 2018;(39):3–11.
15. Селиванов В.Н., Буданов Б.А., Аланкин Д.В. Кинетическая модель удаления водорода при циркуляционном вакуумировании стали. *Теория и технология металлургического производства*. 2013;(1(13)):31–33.
16. Selivanov V.N., Budanov B.A., Alankin D.V. Kinetic model of hydrogen removal during circulating degassing of steel. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2013;(1(13)):31–33. (In Russ.).
17. Dong W., Xu A., Liu B., Zhou H., Ji C., Wang S., Li H., Wang T. Mechanism and model of nitrogen absorption of molten steel during N<sub>2</sub> injection process in RH vacuum. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2024;55(1): 72–82. <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02937-8>
18. Дорштейн Ф., Темберген Д. Критерии выбора вакуумных насосов для агрегатов внепечной обработки стали. *Черные металлы*. 2013;(9):37–45.
19. Dorstevits F., Tembergen D. Vacuum pump systems for secondary metallurgical processes. *Chernye metally*. 2013;(9): 37–45. (In Russ.).
20. Бургман В., Давенет Ж. Структура затрат на вакуумирование стали с учетом обработки в агрегате ковш-печь. *Черные металлы*. 2012;(11):41–49.
21. Burgmann V., Davenet J. The cost structure of steel vacuuming, taking into account the processing in the bucket-furnace unit. *Chernye metally*. 2012;(11):41–49. (In Russ.).

18. Кашеев И.Д. Свойства и применение огнеупоров. Москва: Теплотехник; 2004:352.
19. LIN CS. Analysis of Temperature Dropping of Molten Steel in Ladle for Steelmaking. *China Steel Technical Report*. 2022;(35):7–12.
20. Полулях Л.А., Евсеев Е.Г., Савостьянов А.В., Бочери-ков Р.Е. Исследование поведения фосфора при производстве марганцевых сплавов с использованием руд с низким содержанием марганца. *Металлург*. 2023;(4):58–62. [https://doi.org/10.52351/00260827\\_2023\\_04\\_58](https://doi.org/10.52351/00260827_2023_04_58)  
Polulyakh L.A., Evseev E.G., Savostyanov A.V., Boche-rikov R.E. Study of the behavior of phosphorus in the production of manganese alloys using ores with a low manga-  
nese content. *Metallurgist*. 2023;67(10):469–475. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01532-1>
21. Нуржанов О.С., Петелин А.Л., Нуржанов А.С., Полу-лях Л.А. Анализ зоны распространения и расчет полей кон-центраций в атмосфере выбросов мелкодисперсной пыли доменной печи № 4 ОАО «НЛМК». *Черные металлы*. 2022;(9):76–81. <https://doi.org/10.17580/chm.2022.09.12>  
Nurzhanov O.S., Petelin A.L., Nurzhanov A.S., Polu-lyakh L.A. Analysis of the propagation zone and calculation of concentration fields in the atmosphere of emissions of fine dust from blast furnace No. 4 (PJSC NLMK). *Chernye metally*. 2022;(9):76–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2022.09.12>

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Вячеслав Андреевич Мурашов**, инженер, Национальный иссле-довательский университет «МЭИ»

ORCID: 0009-0007-9576-8539

E-mail: MurashovViacA@mpei.ru

**Константин Владимирович Строгонов**, к.т.н., доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ORCID: 0000-0003-3276-4403

E-mail: StrogonovKV@mpei.ru

**Андрей Константинович Бастынец**, студент, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

E-mail: BastynetsAK@mpei.ru

**Дмитрий Дмитриевич Львов**, аспирант, Национальный иссле-довательский университет «МЭИ»

ORCID: 0000-0002-3808-2094

E-mail: LvovDD@mpei.ru

**Viacheslav A. Murashov**, Engineer, Moscow Power Engineering Insti-tute

ORCID: 0009-0007-9576-8539

E-mail: MurashovViacA@mpei.ru

**Konstantin V. Strogonov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Innovative Technologies of Knowledge-Intensive Industries, Moscow Power Engineering Institute

ORCID: 0000-0003-3276-4403

E-mail: StrogonovKV@mpei.ru

**Andrey K. Bastynets**, Student, Moscow Power Engineering Institute

E-mail: BastynetsAK@mpei.ru

**Dmitry D. Lvov**, Postgraduate, Moscow Power Engineering Institute

ORCID: 0000-0002-3808-2094

E-mail: LvovDD@mpei.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**В. А. Мурашов** – анализ литературных данных, выполнение рас-четов, разработка вакууматора непрерывного действия, анализ результатов, написание статьи.

**К. В. Строгонов** – научное руководство, разработка вакууматора непрерывного действия и зоны внедоменного жидкофазного восстановления железа, обсуждение результатов экспериментов, написание статьи.

**А. К. Бастынец** – анализ литературных данных, проверка расче-тов, анализ результатов, написание статьи.

**Д. Д. Львов** – анализ литературных данных, проверка расчетов, разработка зоны внедоменного жидкофазного восстановления железа, анализ результатов, написание статьи.

**V. A. Murashov** – literary analysis, performing calculations, develop-ment of a continuous vacuum degasser, analysis of results, writing the text.

**K. V. Strogonov** – scientific guidance, development of a continuous vacuum degasser and a zone for nonblast-furnace liquid-phase iron reduction, discussion of experimental results, writing the text.

**A. K. Bastynets** – literary analysis, verification of calculations, analysis of results, writing the text.

**D. D. Lvov** – literary analysis, verification of calculations, development of a zone for nonblast-furnace liquid-phase iron reduction, analysis of results, writing the text.

Поступила в редакцию 10.07.2024

После доработки 31.07.2024

Принята к публикации 22.08.2024

Received 10.07.2024

Revised 31.07.2024

Accepted 22.08.2024