

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 66.048.3.069.835

EDN: СКВЛІВ

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-360-370



Электрообезвоживание каменноугольной смолы – побочного продукта при получении кокса для доменной плавки

И.А. Головашов^{1✉}, Д.И. Алексеев², А.В. Швалева³

¹⁻³Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Новотроицк, Россия

Резюме. Целью исследования являлась адаптация технологии электрообезвоживания нефти применительно к каменноугольной смоле (побочного продукта при производстве кокса для доменной плавки) для удаления золы (фусов) и воды. Объектом исследований – каменноугольная смола, поступающая с коксовых батарей, которая с водой и золой образует коллоидную систему. В работе использовали метод электрообезвоживания, используемый в настоящее время для удаления воды из коллоидной системы нефть–вода. Рассмотрена конструкция электродегидрататора 2-ЭГ-160-2, а также особенности подачи смолы в электродегидрататор (в сравнении с подачей нефти). Показано, что в предлагаемом способе работы электродегидрататора смола и фусы будут оседать в нижней части агрегата ввиду большей плотности воды (плотность смолы порядка 1200 кг/м³ и более). Предложена схема включения электродегидрататора в схему обезвоживания на коксохимическом предприятии. Произведен расчет процесса разделения каменноугольной смолы в электродегидрататоре. В результате полученных в ходе расчетов показателей можно сделать вывод, что производительность данного оборудования при обезвоживании смолы (в отличие от нефти) значительно снижается, что связано с большей плотностью и вязкостью смолы. Вследствие высокой вязкости смолы по сравнению с вязкостью нефти (при 80 °С в ~ 40 раз) производительность электродегидрататора по смоле составит ~40 тыс. т (для нефти ~ 1 млн т). Однако производительности в 40 тыс. т по одному электродегидрататору достаточно, чтобы закрыть потребности по обезвоживанию каменноугольной смолы для АО «Уральская Сталь». В результате проведенных исследований предложено включение в общую схему обезвоживания каменноугольной смолы электродегидрататора с целью достижения нормативных показателей смолы для дальнейшего ее применения и продажи в качестве целевого продукта. *Благодарности.* Данная работа выполнена в рамках проекта образовательно-производственных групп, реализуемых в сотрудничестве НФ НИТУ «МИСИС» и АО «Уральская Сталь».

Ключевые слова: чугун, кокс, смола, вода, фусы, коллоидная структура, разрушение

Благодарности. Данная работа была проведена в рамках проекта учебно-производственных групп, реализуемого совместно с НФ НИТУ «МИСИС» и ОАО «Уральская сталь».

Для цитирования: Головашов И.А., Алексеев Д.И., Швалева А.В. Электрообезвоживание каменноугольной смолы – побочного продукта при получении кокса для доменной плавки // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 360–370. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-360-370>. EDN: СКВЛІВ.

METALLURGY

Original article

Electric dehydration of coal tar – a by-product of coke production for blast furnace smelting

Ilya A. Golovashov^{1✉}, Danil I. Alekseev², Anna V. Shvaleva³

¹⁻³University of Science and Technology “MISIS”, Novotroitsk, Russia

Abstract. The aim of the study was to adapt the technology of electric dehydration of oil for use with coal tar (a by-product of coke production for blast furnace smelting) in order to remove ash (tar decanter sludge) and water. The research focuses on coal tar generated in coke ovens, which forms a colloidal system with water and ash. The method of electric dehydration was employed in the study, which is currently used to remove water from the oil–water colloidal system. The construction of the 2-EG-160-2 electric dehydrator was examined, along with the specifics of introducing coal tar into it in comparison to oil. It was demonstrated that, under the proposed operational conditions for the electric dehydrator, the coal tar and tar decanter sludge would settle at the bottom of the unit due to their higher density than

that of water (the density of coal tar is approximately 1200 kg/m³ and higher). A scheme for integrating the electric dehydrator into the de-ashing process at a coke-chemical plant was proposed. The process of separating coal tar in the electric dehydrator was calculated. The results demonstrated that the efficiency of the equipment in the dehydration of coal tar, in comparison to oil, is considerably lower due to its higher density and viscosity (approximately 40 times higher at 80 °C). Consequently, the performance of the electric dehydrator for coal tar would be approximately 40,000 tons, as opposed to approximately 1 million tons for oil. Nevertheless, the aforementioned performance per electric dehydrator is sufficient to meet the dehydration needs of AO “Ural Steel” for coal tar. Therefore, it is recommended that the electric dehydrator be integrated into the general coal tar dehydration scheme in order to ensure that the required quality standards for the tar are met, allowing it to be used and sold as a target product.

Keywords: cast iron, coke, resin, water, fuses, colloidal structure, destruction

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the project of training and production groups implemented in cooperation with the Novotroitsk Branch of the National Research Technical University of the Moscow Institute of Steel and Alloys and JSC «Ural Steel».

For citation: Golovashov I.A., Alekseev D.I., Shvaleva A.V. Electric dehydration of coal tar – a by-product of coke production for blast furnace smelting. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):360-370. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-360-370>. EDN: CKBJIB.

ВВЕДЕНИЕ

Черная металлургия является одной из базовых областей промышленности, которая позволяет формировать экономический суверенитет России, является опорой при реализации новых государственных проектов [1]. Металлургический комплекс крупнотоннажно выпускает широкий ассортимент продукции, востребованный как на территории России, так и за ее рубежом. Металлургические производства, как правило, выплавляют сталь для дальнейшего передела в готовую продукцию, которую получают при обработке чугуна. В настоящее время доменные производства интенсивно модернизируются, что связано с возросшими требованиями к чугуну и необходимостью выполнять требования экологических регламентов по выбросам. При модернизации доменного производства возрастают требования к сырью, в частности, к коксу и экологическим аспектам его производства [2, 3].

Металлургический кокс получают при спекании коксующихся марок углей при температуре 1050–1100 °С. Основная химическая реакция, которая происходит с коксом в доменном процессе – это реакция Белла-Будуара, то есть взаимодействие углерода кокса с углекислым газом CO₂ с выделением оксида углерода CO. Оксид углерода CO, в свою очередь, является основным восстановителем оксидов железа в доменном процессе. Таким образом, металлургический кокс в доменном процессе выполняет три основных функции: выступает в качестве топлива и источника тепловой энергии для эндотермических процессов плавления чугуна и шлака; является восстановителем, поскольку из кокса образуется CO; слой кокса за счет своего

размера (в среднем 40–60 мм) является газопроницаемой матрицей, «губкой», которая позволяет стекать шлаку и чугуну вниз, а доменным газам проходить вверх к колошнику через загрузку.

Основным преимуществом применения кокса по сравнению с альтернативными углеродосодержащими видами топлива (пылеугольное топливо, каменный уголь, древесный уголь) является способность кокса обеспечивать проницаемость слоя шихты доменной печи для газов, шлака и чугуна. Данное преимущество реализуется за счет того, что кокс обладает высокой механической прочностью по сравнению с альтернативными видами углеродосодержащего топлива, не разрушается при загрузке в скипы и доменную печь, нагрузке слоя шихтового материала. Вместе с тем необходимо отметить стремление металлургов снизить расход кокса в доменном процессе, поскольку кокс является самым дорогостоящим компонентом в шихтовой доменной загрузке (порядка 15–20 тыс. руб. за 1 т кокса). В последнее время развиваются технологии вдувания пылеугольного топлива [4–10] и природного газа [11–14]. Однако попытки полностью заменить кокс в доменном процессе пока не привели к успеху, поэтому на сегодняшний день наблюдается тенденция увеличения объемов производства кокса в мире [4].

Побочным продуктом при получении металлургического кокса является каменноугольная смола, которая представляет собой вязкую маслянистую жидкость с запахом нафталина. Каменноугольная смола является сырьем для производства нафталина и электродов для электрометаллургии. Потребители предъявляют к смоле ряд требо-

ваний в соответствии с ТУ 19.10.20-203-00190437-2020 «Смола каменноугольная» [15–17]. Смола с повышенной зольностью имеет меньшую технологическую ценность и меньшую стоимость при продаже. Кроме того, в случае, если каменноугольная смола не будет удовлетворять требованиям потребителей по своим параметрам, остро обозначится проблема ее утилизации, поскольку останавливать производство кокса не представляется возможным ввиду его востребованности и незаменимости в производстве стал. По этой причине важно снижать зольность полученной смолы. Зола в смоле сконцентрирована в фусах (частишки угля и кокса в смоле). Фусы, вода и смола образуют устойчивую коллоидную систему, которую достаточно трудно разрушить. По классической технологии на коксохимических предприятиях предусмотрен процесс дешламации, который реализован с помощью центрифугирования смолы и выделения из нее твердых фусов. Основным аппаратом процесса дешламации является центрифуга типа ЦГПШ-450. Данная центрифуга, разработанная еще в СССР, имеет ряд существенных недостатков: а) низкую эффективность дешлама-

ции; б) высокую металлоемкость из-за большого диаметра ротора (вес центрифуги 28 т); в) низкую производительность по смоле (до 10 т/ч); г) частый выход из строя узлов среза фусов и отбора смолы и воды; д) низкую степень автоматизации; е) высокую вибрацию при срезе фусов; ж) является источником повышенной загазованности из-за отсутствия полной герметизации [18, 19].

В нефтепереработке распространен процесс электрообессоливания, который происходит в электродегидрататорах. Обессоленная и обезвоженная нефть содержит 3-4 мг/дм³ солей и до 0,1% по массе воды [20].

Цель исследования – адаптация технологии электрообезвоживания нефти применительно к каменноугольной смоле для удаления фусов и воды с использованием стандартного оборудования, применяемого в нефтепереработке, – электродегидрататора 2ЭГ160-2 (взамен классической технологии⁴).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема электродегидрататора 2ЭГ160-2 представлена на рис. 1. Характеристики данного оборудования представлены в табл. 1.

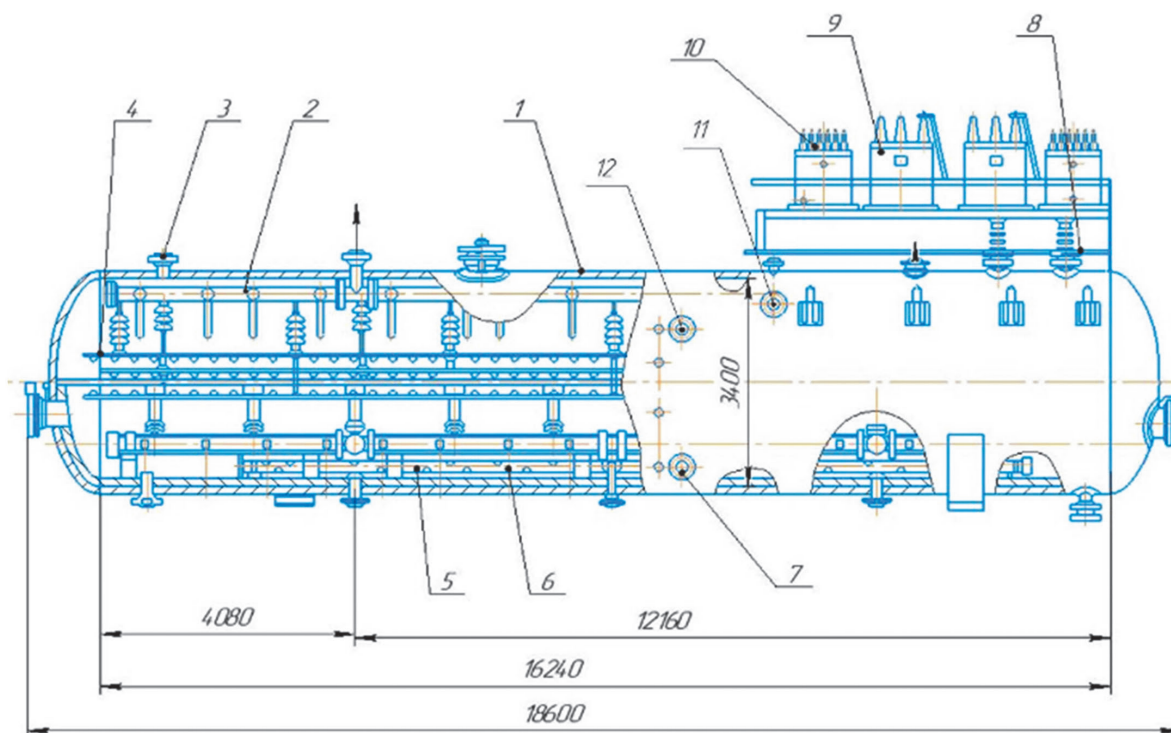


Рис. 1. Общий вид электродегидрататора 2ЭГ-160-2
Fig. 1. General view of 2ЭГ-160-2 electrical dehydrator

⁴Прокофьева Т.В., Андриканис В.В., Круглов С.С., Гафарова Э.Б. Расчет электродегидрататора: учеб. пособ. М.: ИЦ РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2016. 31 с.

Таблица 1. Характеристика 2ЭГ160-2
Table 1. 2ЭГ160-2 specifications

Показатель	Значение
Длина	18650 мм
Внутренний диаметр	3400 мм
Толщина стенки	25 мм
Высота	5700 мм
Номинальный объем	160 м ³
Производительность	<450 м ³ /ч (<360 т/ч)
Расчетная температура	<160 °С
Расчетное давление	<1,8 МПа
Первичное напряжение трансформатора	380 В
Вторичное напряжение трансформатора (между электродами)	22; 33; 44 кВ
Масса аппарата	60 т
Частота переменного тока	50 Гц
Расчетный ток	50 А
Мощность источника питания	160 кВт

Принцип удаления из нефти золы и воды в электродегидраторе следующий. Продукт в электродегидратор поступает через штуцер (7) и попадает в распределительный коллектор (6) в нижнюю часть корпуса электродегидратора под промывную воду, которая подается через штуцер (12), при этом более легкая нефть (меньшая плотность) поднимается вверх электродегидратора, а промывная вода (большая плотность) опускается вниз. Таким образом, в электродегидраторе организован противоточный процесс промывки нефти и ее обессоливания. Распределитель исходного сырья представляет собой коллектор, проходящий по всему аппарату, с присоединенными к нему горизонтальными отводами. Обессоленная нефть выводится через верхний штуцер (11). На высоте чуть больше половины аппарата прикреплены два рамных прямоугольных электрода (4) один над другим. В процессе противоточного движения нефти и воды на них воздействует электрическое поле, организованное с помощью электрода (4). Electrodes are located at a distance of 25–40 cm from each other. Under the influence of a weak electric field, arising between the surface of water and the lower electrode, on the way of oil in the inter-electrode space, large water particles are precipitated. In a strong electric field, oil with smaller water particles, which is necessary for the action of the field with a higher voltage, occurs. It happens that small particles of water in droplets, which are in a non-polar liquid, are polarized, are stretched

in the form of ellipsoids with oppositely charged ends and are attracted to each other. As they approach, the forces of attraction increase to a magnitude that allows them to break through the film separating them. Droplets, colliding with each other, coalesce and settle under the action of gravity. It occurs that the destruction of the colloidal system. Two porcelain insulators, located in the middle part of the electrodehydrator and passing through its entire length, are fixed to the body of the apparatus with the help of suspension insulators (8), made of porcelain garlands. The output of water from the electrodehydrator is produced through a drainage collector (5) and a nozzle, which is located automatically by level. The power is taken from two transformers of the OM-66/35 type with a capacity of 5 kW.

Схема работы электродегидратора 2ЭГ160-2 в технологической схеме нефтеперерабатывающего предприятия представлена на рис. 2.

Сырая нефть попадает в сырьевой насос (1), а далее в теплообменники (2) и паровой подогреватель (3). После подогревателя нефть поступает в термоотстойник (4), где происходит отделение крупных частиц воды путем отстаивания. На пути транспортирования из термоотстойника в электродегидратор нефть смешивают с щелочью, прошедшей через дозировочный насос (9). Смешанная со щелочью нефть попадает в электродегидратор (5), где происходит первая стадия отделения мелких частиц воды. После первой ступени обессоленный продукт следует во

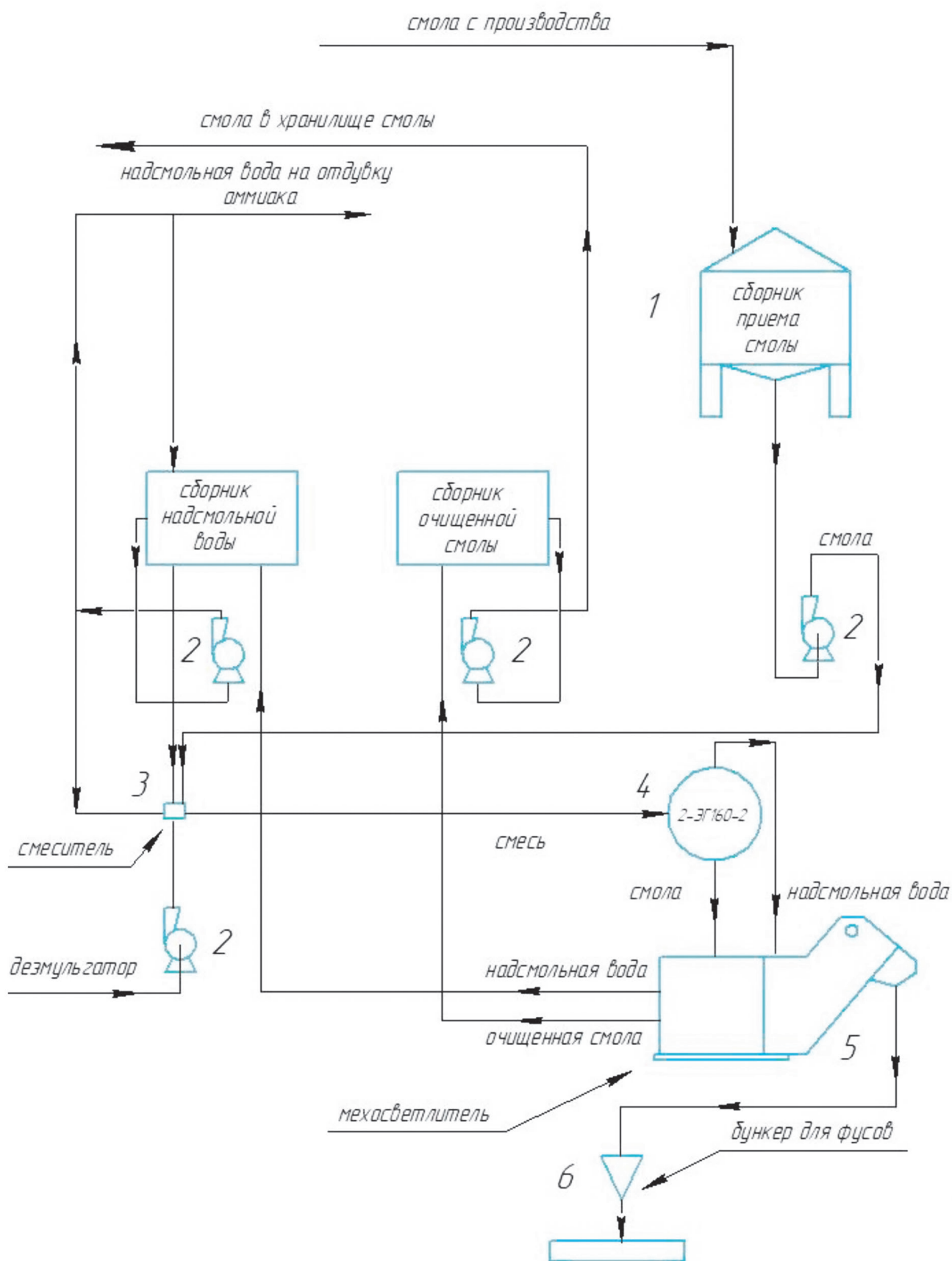


Рис. 3. Технологическая схема ЭЛОУ
 Fig. 3. Desalter flow diagram

системы будет служить более качественная обработка смолы относительно обработки на установке дешламации. В нашей работе мы проводим исследование установки электродегидратора 2ЭГ-160-2.

Расчет скорости осаждения капель воды передается следующей зависимостью [23, 24]:

$$w_0 = \frac{1}{18} \cdot \frac{g \cdot d^2 (\rho_{\text{ВОДЫ}} - \rho_{\text{Н}})}{\nu_{\text{Н}} \cdot \rho_{\text{Н}}},$$

где g – ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}$; d – диаметр осаждающейся капли, м ; $\rho_{\text{ВОДЫ}}$ – плотность воды; $\rho_{\text{Н}}$ – плотность нефти, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\nu_{\text{Н}}$ – кинематическая вязкость нефти, $\text{м}^2/\text{с}$.

Режим осаждения, критерий Рейнольдса, рассчитывается по следующей формуле:

$$Re = \frac{w_0 \cdot d}{\nu_{\text{Н}}^{80}},$$

где w_0 – скорость осаждения капель воды, $\text{м}/\text{с}$; d – диаметр осаждающейся капли, м ; $\nu_{\text{Н}}$ – кинематическая вязкость нефти, $\text{м}^2/\text{с}$.

Производительность 2ЭГ-160-2 по сырью рассчитывается по формуле:

$$G = \frac{1}{72} \cdot L \cdot D \cdot \frac{g d^2 (\rho_{\text{ВОДЫ}}^{80} - \rho_{\text{Н}}^{80})}{\nu_{\text{Н}}^{80} \cdot \rho_{\text{Н}}^{80}},$$

где L – длина аппарата, м ; D – внутренний диаметр аппарата, м ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}$; d – диаметр осаждающейся капли, м ; $\rho_{\text{ВОДЫ}}^{80}$ – плотность воды $\rho_{\text{Н}}$ – нефти соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\nu_{\text{Н}}$ – кинематическая вязкость нефти, $\text{м}^2/\text{с}$.

Формулы реализованы в табличном процессоре. Исходные данные для расчета представлены в табл. 2, 4, результаты расчетов сведены в табл. 3, 5 [25].

Таблица 2. Исходные данные расчета по смоле

Table 2. Initial calculation data for resin

№	Исходные данные	Значение
1	Наименьший диаметр капель воды d , м	0,00022
2	Плотность воды $\rho_{\text{ВОДЫ}}$ при 80°C , $\text{кг}/\text{м}^3$	980
3	Кинематическая вязкость смолы $\nu_{\text{Н}}$ при 80°C , $\text{м}^2/\text{с}$	0,000075
4	Плотность смолы $\rho_{\text{Н}}$ при 80 (плотность нефти), $\text{кг}/\text{м}^3$	1220
5	Длина аппарата L , м	18,6
6	Диаметр аппарата D , м	3,4

Таблица 3. Расчетные данные по смоле

Table 3. Resin calculation data

№	Параметр	Значение
1	Скорость осаждения капель воды в неподвижной среде W_0 , $\text{м}/\text{с}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$
2	Условие применения уравнения Стокса Re , безразмерная величина	$2,03 \cdot 10^{-4}$
3	Производительность электродегидратора, $\text{м}^3/\text{с}$	0,0011
4	Производительность электродегидратора, $\text{м}^3/\text{ч}$	3,938
5	Производительность электродегидратора, $\text{т}/\text{ч}$	4,804
6	Производительность электродегидратора, $\text{т}/\text{сут}$	115,302
7	Производительность электродегидратора, $\text{т}/\text{мес.}$	3459,065
8	Производительность электродегидратора, $\text{т}/\text{год}$	41509
9	Производительность коксохимического производства по смоле, $\text{т}/\text{год}$	40000

Таблица 4. Исходные данные расчета по нефти

Table 4. Initial calculation data for oil

№	Исходные данные	Значение
1	Наименьший диаметр капель воды d , м	0,00022
2	Плотность воды $\rho_{\text{ВОДЫ}}$ при 80°C , $\text{кг}/\text{м}^3$	958
3	Кинематическая вязкость нефти $\nu_{\text{Н}}$ при 80, $\text{м}^2/\text{с}$	$1,95\text{E}-06$
4	Плотность нефти $\rho_{\text{Н}}$ при 80 (плотность нефти), $\text{кг}/\text{м}^3$	794,8
5	Длина аппарата L , м	18,6
6	Диаметр аппарата D , м	3,4

Таблица 5. Расчетные данные по нефти
Table 5. Oil calculation data

№	Параметр	Значение
1	Скорость осаждения капель воды в неподвижной среде W_0 , м/с	0,0028
2	Режим осаждения, критерий Рейнольдса Re , безразмерная величина	0,313
3	Производительность электродегидрататора, м ³ /с	0,044
4	Производительность электродегидрататора, м ³ /ч	158,0
5	Производительность электродегидрататора, т/ч	125,6
6	Суточная производительность электродегидрататора, т/сут	3015
7	Месячная производительность электродегидрататора, т/мес.	90468
8	Годовая производительность электродегидрататора, т/год	1085614

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставляя данные табл. 3 и 5, можно сделать вывод, что производительность электродегидрататора 2ЭГ-160-2, используемого для разрушения коллоидной системы фусы–смола–вода, значительно ниже аналогичного показателя при проведении операции разрушения коллоидной системы нефть–вода–соли (1 млн т год, против 41 тыс. т в год), что связано с большей плотностью и вязкостью смолы. Тем не менее для решения задачи разрушения коллоидной системы фусы–смола–вода в условиях коксохимического производства АО «Уральская Сталь» при годовом производстве каменноугольной смолы в 40 тыс. т в год производительности электродегидрататора достаточно (см. табл. 3, строки 8 и 9) [26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из существующих проблем на металлургическом предприятии АО «Уральская Сталь» является повышенная зольность каменноугольной смолы (побочного продукта при производстве кокса, используемого в доменной плавке), что снижает ее стоимость на рынке, а также приводит к коммерческим спорам с потребителями. Анализ классического метода дешламации смолы показал, что центрифугирование смолы с помощью центрифуг старого образца неэффективно. Для решения проблемы дешламации мы предложили метод электрообессоливания, который

применяется в нефтепереработке, в основе которого лежит промывка нефти с разрушением коллоидной системы нефть–вода под действием электростатических сил. Аналогичным образом предлагается разрушать коллоидную систему фусы–смола–вода. Особенностью работы электродегидрататора при разрушении коллоидной системы фусы–смола–вода является необходимость подавать смолу сверху, а воду снизу, что связано с тем, что плотность смолы больше, чем воды в отличие от нефти. В работе проведен расчет процесса отстаивания смолы на основе стандартного расчета отстаивания нефти. Расчетом показано, что производительность электродегидрататора по смоле значительно ниже, чем по нефти (1 млн т нефти в год против 41 тыс. т смолы). Однако для условий АО «Уральская Сталь» с годовым объемом производства смолы в 40 тыс. т производительности 2-ЭГ-160-2 достаточно. Зола смолы в основном сконцентрирована в фусах – частицах угля и кокса. Поскольку в электродегидрататоре стандартной конструкции не предусмотрены скребки, то в дополнение к нему должен идти первичный отстойник для конечного удаления фусов. В работе предложена также схема подключения электродегидрататора и первичного отстойника в действующей схеме движения смолы на АО «Уральская Сталь». В результате проведенной работы предложено адаптировать стандартный электродегидрататор для решения задачи дешламации смолы на коксохимическом производстве.

Список источников

1. Еремина А.И., Гущина Е.Г. Разработка механизмов развития металлургического производства в регионах России (на примере Волгоградской области) // Modern Economy Success. 2020. № 5. С. 232–234. EDN: IQMQSV.
2. Леонтьев Л., Григорович К. Черная металлургия: состояние и перспективы // Наука в России. 2011. № 4. С. 46–50. EDN: OIWHUN.
3. Shatokhin I.M., Kuz'min A.L., Smirnov L.A., Leont'ev L.I., Bigeev V.A., Manashev I.R. New method for processing metallurgical wastes // Metallurgist. 2017. Vol. 61. No. 7-8. P. 523–528. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4>.

4. Diez M.A., Alvarez R.A., Barriocanal C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking // International Journal of Coal Geology. 2002. Vol. 50. Iss. 1. P. 389–412. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00123-4).
5. Шаповалова Н.Г., Гуменная С.Н. Сравнительный анализ показателей расхода энергоносителей на приготовление и вдувание пылеугольного топлива в горны доменных печей металлургических предприятий Украины // Экология и промышленность. 2018. № 1. С. 92–96. EDN: XOWGVV.
6. Подкорытов А.Л., Кузнецов А.М., Зубенко А.В., Падалка В.П., Ярошевский С.Л., Кочура В.В. Освоение технологии доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива на ЧАО «Енакиевский металлургический завод» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 10. С. 53–65. EDN: ZRWQXV.
7. Филиппов В.В., Михалев В.А., Миронов К.В., Форшев А.А., Тлеугабулов Б.С., Загайнов С.А. Развитие теории и технологии выплавки ванадиевого чугуна с применением пылеугольного топлива // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 4. С. 22–26. EDN: ZBQQXN.
8. Миронов К.В., Михалев В.А., Буньков А.А., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю. Опыт вдувания пылеугольного топлива при выплавке ванадиевого чугуна на ЕВРАЗ НТМК // Сталь. 2015. № 5. С. 17–19. EDN: UADBEV.
9. Ярошевский С.Л., Кузнецов А.М., Курбатов Ю.Л., Кочура В.В., Афанасьева З.К. Исследование особенностей теплообмена в фурменной зоне доменной печи при вдувании ПУТ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 4. С. 14–22. EDN: ZBQQXD.
10. Мирошниченко В.Г., Скляр А.В. Эффективное освоение пылеугольной технологии в доменном цехе ПАО «Алчевский металлургический комбинат» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2016. № 4. С. 24–30. EDN: VXBAJP.
11. Сорокин А.Ю., Пишкин А.А., Дагман А.И., Басов В.И., Титов В.Н., Загайнов С.А. Освоение технологии доменной выплавки чугуна с использованием пылеугольного топлива в доменном цехе № 2 ПАО НЛМК // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. № 7. С. 803–810. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-7>. EDN: IUXGGQ.
12. Лялюк В.П. Анализ работы доменной печи объемом 5000 м³ на фурмах разного диаметра с позиций полных механических энергий потоков комбинированного дутья и горнового газа // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 7. С. 691–699. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-7-691-699>. EDN: KJATLV.
13. Семенов Ю.С., Подкорытов А.Л., Горупаха В.В., Семион И.Ю., Оробцев А.Ю., Шумельчик Е.И. Повышение эффективности использования пылеугольного топлива при производстве чугуна и обжиге известняка в нестабильных технологических условиях // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 7. С. 676–690. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-7-676-690>. EDN: ZMUAZL.
14. Смирнов Л.А., Тлеугабулов Б.С., Загайнов С.А., Пыхтеева К.Б., Филиппов В.В., Михалев В.А., Миронов К.В. Некоторые теоретические аспекты технологии совместного вдувания природного газа и пылеугольного топлива // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2016. № 5. С. 19–23. EDN: WBFSKN.
15. Рогожников С.П., Рогожников И.С. Влияние водорода природного газа на изменение теплового и восстановительного процессов по радиусу доменной печи // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. № 1. С. 41–50. EDN: HJSUBA.
16. Волощук Т.Г. Анализ влияния различных факторов на качество каменноугольной смолы // Наука и производство Урала. 2017. № 13. С. 9–12. EDN: ZCJBWZ.
17. Банников Л.П., Мирошниченко Д.В., Нестеренко С.В., Балаева Я.С., Фатенко С.В. Влияние содержания неокисленных пылевидных классов коксующей шихты на свойства каменноугольной смолы // Наука и производство Урала. 2019. № 3. С. 15–22. EDN: USRMJL.
18. Степанов Е.Н., Артюшечкин Д.А., Дуць Н.В., Смирнов А.Н., Волощук Т.Г. Влияние технологических факторов на качество каменноугольной смолы // Кокс и химия. 2021. № 12. С. 38–41. https://doi.org/10.52351/00232815_2021_12_38. EDN: RXPIKB.
19. Оплеухин С.А., Пукиш В.И., Доровских О.А. Установка дешламмации смолы // Кокс и химия. 2011. № 11. С. 33–35. EDN: OJMYVT.
20. Filoneko Yu.Ya., Konev N.L., Parakhin A.V. Mathematical-statistical prediction of blast furnace coke quality // Кокс и химия. 1991. № 1. EDN: GKWZYH.
21. Вейненский В.В., Барский В.Д. Зависимость реакционной способности кокса от величины зольности и состава золы // Кокс и химия. 1990. № 12. С. 9–12. EDN: QKLBPM.
22. Симакова А.В., Климчук В.А., Папин А.В., Герман Л.В. Каменноугольная смола и факторы влияния на ее характеристики // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: материалы VI Всерос. конф. (г. Кемерово, 29–30 ноября 2022 г.). Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачёва, 2022. С. 402.1–402.4.
23. Мельников И.И., Крячук В.М., Мезин Д.А., Горбунов А.А., Волощук Т.Г. Влияние нефтяной коксующей добавки на качество каменноугольной шихты, кокса и смолы // Кокс и химия. 2011. № 12. С. 21–23. EDN: OKFLNV.
24. Андрейков Е.И., Красникова О.В., Диковинкина Ю.А., Первова М.Г., Зорин М.В., Купрыгин В.В. Характеристики смолы высокотемпературного коксования нефтяного кокса с высоким содержанием летучих веществ // Кокс и химия. 2019. № 12. С. 38–43. EDN: FIEKEL.

25. Саранчук В.И. Математическое описание основных процессов коксохимического производства // Кокс и химия. 1999. № 8. С. 34–37. EDN: RKPZIJ.
26. Кочкин Р.О. Прогноз качества кокса по показателям CSR и CRI // Кокс и химия. 2009. № 10. С. 17–23. EDN: KWHPWX.

References

1. Eremina A.I., Gushchina E.G. Development of mechanisms of development of metallurgical production in the Russian regions (on the example of Volgograd region). *Modern Economy Success*. 2020;5:232-234. EDN: IQMQSV.
2. Leont'ev L., Grigorovich K. Ferrous metallurgy: modern state and prospects. *Nauka v Rossii*. 2011;4:46-50. (In Russ.). EDN: OIWHUN.
3. Shatokhin I.M., Kuz'min A.L., Smirnov L.A., Leont'ev L.I., Bigeev V.A., Manashev I.R. New method for processing metallurgical wastes. *Metallurgist*. 2017;61(7-8):523-528. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0527-4>.
4. Diez M.A., Alvarez R.A., Barriocanal C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking. *International Journal of Coal Geology*. 2002;50(1):389-412. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00123-4).
5. Shapovalova N.G., Gumennaya S.N. Comparative analysis of indicators of utility consumption in process of preparation and injection of pulverized-coal fuel in blast furnace wells in metallurgical enterprises of Ukraine. *Ekologiya i promyshlennost'*. 2018;1:92-96. (In Russ.). EDN: XOWGVV.
6. Podkorytov A.L., Kuznecov A.M., Zubenko A.V., Padalka V.P., Yaroshevskij S.L., Kochura V.V. Mastering the technology for the blast furnace heat with the injection of the pulverized coal fuel into the hearth at the chao "Enakievskiy metallurgicheskij zavod". *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017;10:53-65. (In Russ.). EDN: ZRWQXV.
7. Filippov V.V., Mihalev V.A., Mironov K.V., Forshev A.A., Tleugabulov B.S., Zagainov S.A. Development of the theory and technology of smelting vanadium cast iron using pulverized coal fuel. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017;4:22-26. (In Russ.). EDN: ZBQQXN.
8. Mironov K.V., Mikhalev V.A., Bun'kov A.A., Zagainov S.A., Gileva L.Yu. Experience of pulverized coal fuel injection under vanadium cast iron smelting at EVRAZ NTMK. *Stal'*. 2015;5:17-19. (In Russ.). EDN: UADBEV.
9. Yaroshevskij S.L., Kuznetsov A.M., Kurbatov Yu.L., Kochura V.V., Afanasieva Z.K. Studying heat transfer features in the tuyere zone of a blast furnace under pulverized coal injection. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017;4:14-21. (In Russ.). EDN: ZBQQXD.
10. Miroshnichenko V.G., Sklyar A.V. Effective development of pulverized coal technology in the blast furnace shop of PJSC Alchevsk Metallurgical Plant. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2016;4:24-30. (In Russ.). EDN: VXBAJP.
11. Sorokin A.Yu., Pishikin A.A., Dagman A.I., Basov V.I., Titov V.N., Zagajnov S.A. Mastering the technology of blast furnace smelting of pig iron using pulverized coal fuel in the blast furnace shop no. 2 of PJSC NLMK. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019;7:803-810. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-7>. EDN: IUXGGQ.
12. Lyalyuk V.P. Analysis of the blast furnace operations with a volume of 5000 m³ on tuyeres of different diameters from the positions of full mechanical energies of flows of combined blow and hearth gas. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;76(7):691-699. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-7-691-699>. EDN: KJATLV.
13. Semenov Yu.S., Podkorytov A.L., Gorupakha V.V., Semion I.Yu., Orobytsev A.Yu., Shumel'chik E.I. Efficiency increase of powdered coal application at hot metal production and limestone calcination under unstable technology conditions. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;7:676-690. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-7-676-690>. EDN: ZMUAZL.
14. Smirnov L.A., Tleugabulov B.S., Zagainov S.A., Pykhiteeva K.B., Filippov V.V., Mikhalev V.A., Mironov K.V. Some theoretical aspects of the technology of joint injection of natural gas and pulverized coal. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2016;5:19-23. (In Russ.). EDN: WBFSKN.
15. Rogozhnikov S.P., Rogozhnikov I.S. Effect of the natural gas hydrogen on variation of the heat and reducing processes along the blast furnace radius. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020;1:41-50. (In Russ.). EDN: HJSUBA.
16. Voloshchuk T.G. Analysis of affection of various factors on the quality of coal tar. *Nauka i proizvodstvo Urala*. 2017;13:9-12. (In Russ.). EDN: ZCJBWZ.
17. Bannikov L.P., Balaeva Y.S., Miroshnichenko D.V., Fatenko S.V., Nesterenko S.V. Influence of small coal particles in coking batch on coal-tar quality. *Nauka i proizvodstvo Urala*. 2019;3:15-22. (In Russ.). EDN: USRMJL.
18. Stepanov E.N., Artyushechkin D.A., Duts N.V., Smirnov A.N., Voloschuk T.G. Influence of production conditions on the quality of coal tar. *Koks i himiya*. 2021;12:38-41. (In Russ.). https://doi.org/10.52351/00232815_2021_12_38. EDN: RXPIKB.
19. Opleukhin S.A., Pukish V.I., Dorovskikh O.A. Slurry removal from tar. *Koks i himiya*. 2011;11:33-35. (In Russ.). EDN: OJMYVT.
20. Filoneko Yu.Ya., Konev N.L., Parakhin A.V. Mathematical-statistical prediction of blast furnace coke quality. *Koks i himiya*. 1991;1. EDN: GKWZYH.

21. Vejnenskij V.V., Barskij V.D. Dependence of coke reactivity on ash content and ash composition. *Koks i himiya*. 1990;12:9-12. (In Russ.). EDN: QKLBPM.
22. Simakova A.V., Klimchuk V.A., Papin A.V., German L.V. Coal tar and factors influencing its characteristics. In: *Himiya i himicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy: materialy VI Vserossijskoj konferencii = Chemistry and chemical technology: achievements and prospects: materials of the 6th All-Russian conference*. 29–30 November 2022, Kemerovo. Kemerovo: T.F. Gorbachev State Technical University; 2022, p. 402.1-402.4. (In Russ.).
23. Mel'nikov I.I., Kryachuk V.M., Mezin D.A., Gorbunov A.A., Voloshchuk T.G. Influence of petroleum coking additive on the quality of coal batch, coke, and tar. *Koks i himiya*. 2011;12:21-23. (In Russ.). EDN: OKFLNV.
24. Andreikov E.I., Krasnikova O.V., Dikovinkina Y.A., Pervova M.G., Zorin M.V., Kuprygin V.V. Characteristics of high-temperature coking tar of volatile-rich petroleum coke. *Koks i himiya*. 2019;12:38-43. (In Russ.). EDN: FIEKEL.
25. Saranchuk V.I. Mathematical description of the main processes of coke production. *Koks i himiya*. 1999;8:34-37. (In Russ.). EDN: RKPZIJ.
26. Kochkin R.O. Forecast of coke quality based on CSR and CRI indicators. *Koks i himiya*. 2009;10:17-23. (In Russ.). EDN: KWHPWX.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Головашов Илья Александрович,

студент,
Новотроицкий филиал Национального
исследовательского технического университета
Московского института стали и сплавов,
462359, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, д. 8, Россия
✉ golovashovilya56@yandex.ru

Алексеев Данил Игоревич,

к.т.н.,
доцент кафедры математики и естествознания,
Новотроицкий филиал Национального
исследовательского технического университета
Московского института стали и сплавов,
462359, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, д. 8, Россия
alekseev41047@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-7917-2299>

Швалева Анна Викторовна,

канд. пед. наук, доцент,
доцент кафедры математики и естествознания,
Новотроицкий филиал Национального
исследовательского технического университета
Московского института стали и сплавов,
462359, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, д. 8, Россия
shvaleva.1978@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya A. Golovashov,

Student,
Novotroitsk Branch of the
National Research Technical University
of the Moscow Institute of Steel and Alloys,
8 Frunze St., Novotroitsk 462359, Russia
✉ golovashovilya56@yandex.ru

Danil I. Alekseev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the
Department of Mathematics and Natural Sciences,
Novotroitsk Branch of the
National Research Technical University
of the Moscow Institute of Steel and Alloys,
8 Frunze St., Novotroitsk 462359, Russia
alekseev41047@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-7917-2299>

Anna V. Shvaleva,

Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Mathematics and Natural Sciences,
Novotroitsk Branch of the
National Research Technical University
of the Moscow Institute of Steel and Alloys,
8 Frunze St., Novotroitsk 462359, Russia
shvaleva.1978@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 03.06.2024 г.; принята к публикации 05.06.2024 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 28.04.2024; approved after reviewing 03.06.2024; accepted for publication 05.06.2024.