



Оригинальная статья

УДК 669.162.2:004.942

DOI 10.17073/0368-0797-2021-12-921-929



ИССЛЕДОВАНИЕ В СРЕДЕ ANSYS ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВОЗДУШНОЙ ФУРМЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

С. Д. Сайфуллаев¹, С. В. Албул¹, О. А. Кобелев^{1,2}, И. А. Левицкий¹,
А. Г. Радюк¹, А. Е. Титлянов¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

² Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» (Россия, 115088, Москва, Шарикоподшипниковская ул., 4)

Аннотация. Известно, что максимальные тепловые потери в воздушной водоохлаждаемой фурме доменной печи приходятся на дутьевой канал. Эффективным способом их снижения является установка теплоизолирующей керамической вставки. Теплоизолирующие вставки, установленные во внутренний стакан воздушных фурм для доменной печи № 5 ПАО «Северсталь», снижают тепловые потери через фурму на 30 %, а вставки, изолирующие большую часть внутренней поверхности рыльной части, дополнительно снижают тепловые потери через фурму на 26,2 %. С помощью программного комплекса ANSYS исследовано влияние конструктивных параметров на тепловые процессы в воздушной фурме доменной печи с теплоизолирующей вставкой. Для большей реалистичности моделирования в данной работе в качестве области моделирования рассматривалась вся воздушная фурма, включая контур водяного охлаждения. Выступ вставки в дутьевой канал на 2 мм улучшает перемешивание природного газа и дутья, способствует горению газа в дутьевом канале, что приводит к повышению тепловых потерь через дутьевой канал и снижению стойкости вставки. Для повышения стойкости вставки и снижения тепловых потерь через дутьевой канал обосновано применение удлиненной вставки переменной толщины, изменяющейся с 13 до 8 мм по направлению дутья, не выступающей в дутьевой канал и имеющей угол между нормалью к стенке внутреннего стакана и осью отверстия для подачи природного газа около 30°. Показано, что для получения максимального теплосодержания дутья, на которое влияет горение природного газа и тепловые потери с охлаждающей водой в дутьевом канале, предпочтителен вариант с удлиненной вставкой переменной толщины, изменяющейся с 10 до 8 мм по направлению дутья, и осью отверстия для подачи природного газа, перпендикулярной стенке внутреннего стакана.

Ключевые слова: доменная печь, воздушная фурма, теплоизолирующая вставка, тепловые потери, компьютерное моделирование

Для цитирования: Сайфуллаев С.Д., Албул С.В., Кобелев О.А., Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Исследование в среде ANSYS влияния конструктивных параметров на тепловые процессы в воздушной фурме доменной печи // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 921–929. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-921-929>

Original article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS ON THERMAL PROCESSES IN A BLAST FURNACE TUYERE USING ANSYS SOFTWARE

S. D. Saifullaev¹, S. V. Albul¹, O. A. Kobelev^{1,2}, I. A. Levitskii¹,
A. G. Radyuk¹, A. E. Titlyanov¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

² JSC Russian State Research Center “CNIITMASH” (4 Sharikopodshipnikovskaya Str., Moscow 115088, Russian Federation)

Abstract. It is known that the maximum heat losses in a water-cooled tuyere of a blast furnace are in the blowing channel. An effective way to reduce them is to install a heat-insulating ceramic insert. Such inserts installed in the inner cup of air tuyeres for the blast furnace no. 5 of PJSC “Severstal” reduce heat losses through the tuyere by 30 %, and inserts, which, in addition, insulate most of the inner surface of the snout part, further reduce heat losses through the tuyere by 26.2 %. The ANSYS software was used to study the effect of design parameters on thermal processes in a blast furnace tuyere with heat-insulating insert. To make the simulation more realistic the entire air tuyere, including water-cooling circuit, was considered as the modeling object. Protrusion of the insert into the blowing channel by 2 mm improves the mixing of natural gas and blast, promotes gas combustion, which leads to an increase in heat losses through the blowing channel and a decrease in resistance of the insert. To increase durability of the insert

and reduce heat losses through the blowing channel, it is justified to use an elongated insert with a thickness varying from 13 to 8 mm in the blowing direction, which does not protrude into the blowing channel, having an angle between the normal to the side of the inner cup and the axis of the hole for natural gas supplying about 30°. It is shown that to obtain the maximum heat content of the blast, which is influenced by the combustion of natural gas and heat losses with cooling water in the blowing channel, it is preferable to have an elongated insert of variable thickness, varying from 10 to 8 mm in the blowing direction, and axis of the hole for natural gas supply perpendicular to the wall of the inner cup.

Keywords: blast furnace, air tuyere, heat-insulating insert, heat losses, computer simulation

For citation: Saifullaev S.D., Albul S.V., Koblelev O.A., Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Investigation of the influence of design parameters on thermal processes in a blast furnace tuyere using ANSYS software. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 921–929. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-12-921-929>

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что максимальные тепловые потери в воздушной водоохлаждаемой фурме доменной печи приходятся на дутьевой канал [1 – 4]. Эффективным способом их снижения является установка теплоизолирующей керамической вставки [5 – 7].

Теплоизолирующие вставки, установленные во внутренний стакан воздушных фурм для доменной печи (ДП) № 5 ПАО «Северсталь», снижают тепловые потери через фурму на 30 % [8]. Однако имеются еще тепловые потери через внутреннюю поверхность рыльной части, которые в этой области фурмы увеличиваются из-за начала горения подаваемого в фурму природного газа.

В работе [9] для дополнительного снижения тепловых потерь через поверхность дутьевого канала была разработана вставка, теплоизолирующая большую площадь внутренней поверхности рыльной части.

Моделирование в среде ANSYS (Fluent, Mechanical) [10 – 13] позволяет выбрать варианты конструкции вставки и геометрии дутьевого канала, обеспечиваю-

щие минимальные напряжения во вставке и тепловые потери через ее поверхность, а также повышение интенсивности сгорания природного газа, что обеспечивает увеличение коэффициента замены кокса природным газом [14 – 16]. В проводимых ранее исследованиях [6 – 9] в качестве области моделирования выбирались дутьевой канал и теплоизолирующая вставка, а другие конструктивные элементы учитывались в расширенных граничных условиях. Для большей реалистичности моделирования в данной работе в качестве области моделирования рассматривалась вся воздушная фурма, включая контур водяного охлаждения.

ПАРАМЕТРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Схема продольного сечения воздушной фурмы представлена на рис. 1.

Рассмотрены варианты конструкции теплоизолирующей вставки в соответствии с размерами, представленными в табл. 1.

Величина зазора между вставкой и внутренним стаканом составила 2,0 мм.

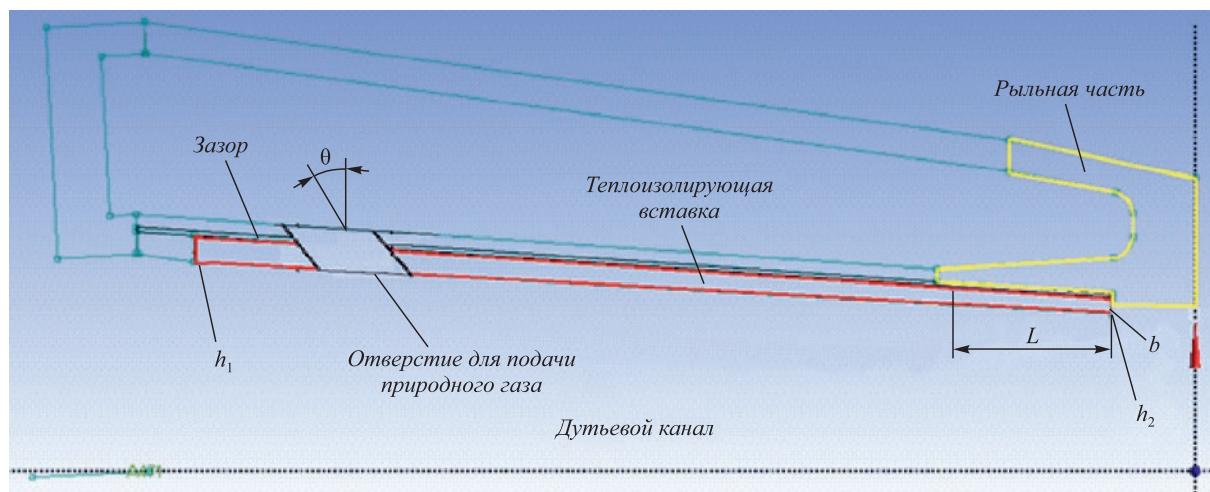


Рис. 1. Схема продольного сечения воздушной фурмы:

h_1 – толщина вставки со стороны фланца, мм; h_2 – толщина вставки со стороны рыльной части, мм; L – удлинение вставки в рыльную часть, мм; b – выступ вставки в дутьевой канал, мм; θ – угол между нормалью к стенке внутреннего стакана и осью отверстия для подачи природного газа, град.

Fig. 1. Scheme of longitudinal section of the air tuyere:

h_1 – insert thickness from the flange side, mm; h_2 – insert thickness from the snout side, mm; L – elongation of the snout insert, mm; b – protrusion of the insert into the blowing channel, mm; θ – angle between the normal to the side of the inner cup and axis of the hole for natural gas supplying, deg.

Таблица 1

Варианты конструкции теплоизолирующей вставки

Table 1. Design options for a heat-insulating insert

Вариант	h_1 , мм	h_2 , мм	L , мм	b , мм	θ , град.
1	10	10	0	2	0
2	10	8	0	0	0
3	10	8	75	0	0
4	13	8	75	0	0
5	13	8	75	0	30
6	13	8	75	2	30
7	13	8	75	2	0

Помимо представленных в табл. 1 вариантов, рассматривались также три варианта конструкции, не содержащие вставок: фурма, в которой она не предусмотрена (вариант 8); конструкция по варианту 1, в которой она разрушена (вариант 9); конструкция по варианту 4, в которой вставка разрушена (вариант 10).

Схема расчетной области была создана в приложении Design Modeler, а расчетная сетка – в приложении ANSYS Meshing.

При моделировании решались уравнения переноса импульса (в трехмерной постановке), уравнение неразрывности (для сжимаемой среды), уравнения

стандартной k – ϵ модели турбулентности (два уравнения), уравнения конвективной диффузии для четырех компонентов (в рамках модели *Species Transport*). Учет взаимодействия между турбулентностью и химией осуществляли в рамках подмодели *Finite Rate/Eddy Dissipation*, позволяющей учитывать и кинетику, и турбулентное перемешивание, а также проверить факт горения в рассматриваемой системе, не делая каких-либо априорных предположений о нем. Рассматривалась одноступенчатая реакция горения природного газа, кинетические характеристики которой взяты из базы данных ANSYS Fluent.

Теплофизические свойства используемых материалов представлены в табл. 2.

Коэффициенты теплоотдачи от окружающей среды (печи) к наружному стакану $\alpha_{н.с}$ и рывальной части α_r определяли для цилиндрической стенки на основании экспериментальных данных: $\alpha_r = 263 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\alpha_{н.с} = 110 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Граничные условия на входе и выходе из фурмы представлены в табл. 3.

Результаты моделирования представлены в табл. 4.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Создание выступа вставки в дутьевом канале приводит к улучшению перемешивания горячего дутья и природного газа (вариант 1 по сравнению с вариантом 2).

Таблица 2

Некоторые теплофизические свойства материалов, используемые при моделировании

Table 2. Some thermophysical properties of materials in simulation

Свойства	Медная часть фурмы	Стальная часть фурмы	Вставка	Материал в зазоре, отделяющем вставку от внутреннего стакана, рывальной части и фланца***	Вода, охлаждающая фурму	Метано-воздушная смесь в дутьевом канале
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	222*	35	8,3	0,4	0,356**	0,0454
Теплоемкость c , Дж/(кг·К)	390	600	1291	840	4182	
Плотность ρ , кг/м ³	8940	7800	3583	1200	998,2	
Температурный коэффициент линейного расширения β , °C ⁻¹			$6.5 \cdot 10^{-6}$			
Модуль Юнга E , Па			$1,82 \cdot 10^{10}$			
Коэффициент Пуассона μ			0,17			

* Представлен эффективный коэффициент теплопроводности с учетом напыления алюминиевого газотермического покрытия.

** Представлен эффективный коэффициент теплопроводности воды, охлаждающей фурму, с учетом пленочного кипения воды.

*** Зазор, отделяющий вставку от внутреннего стакана, рывальной части и фланца, заполнен чередующимися продольными и поперечными полосами силикатного герметика (затвердевающего в процессе работы фурмы) и воздуха, поэтому для заполняющего его материала заданы свойства, близкие к свойствам пустотелого силикатного кирпича.

Таблица 3

Граничные условия во входных и выходных сечениях фурмы, задаваемые при моделировании

Table 3. Boundary conditions in inlet and outlet sections of the tuyere in simulation

Показатель	Условия		
	горячее дутье	природный газ	вода
На входе в фурму			
Состав	30 % O ₂	100 % CH ₄	100 % H ₂ O
Температура, К	1473	300	298
Массовый расход, кг/с	4,539	0,283	8,3
На выходе из фурмы			
Давление дутья (избыточное), Па	405 300		506 625

Таблица 4

Расчетные параметры работы воздушной фурмы со вставками разной конструкции

Table 4. Design operation parameters of the air tuyere with inserts of different designs

Показатель*	Варианты расчета									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_{д.вых}$, кВт	6736,6	6673,1	6740,4	6636,4	6334,9	6284,5	6635,6	6288,3	6932,3	6826,7
$Q_{в.вых}$, кВт	248,9	244,6	216,4	213,7	210,9	214,1	217,4	363,4	402,4	392,9
$Q_{реак}$, кВт	935,8	867,6	907,3	800,5	495,7	449,9	803,9	602,4	1286,4	1171,0
$T_{д.вых}$, К	1421,9	1410,9	1422,0	1408,6	1382,9	1378,3	1410,5	1364,7	1453,7	1436,2
$T_{в.вых}$, К	305,35	305,23	304,4	304,34	304,25	304,35	304,45	308,59	309,76	309,47
$T_{пов.р.тор}$, К	512,8	512,4	511,8	511,7	505,8	517,6	524,9	508,0	528,4	545,9
$T_{зав}$, К	712,2	716,3	729,9	711,9	694,7	692,2	713,5	—	—	—
T_p , К	445,4	440,8	423,9	423,8	419,8	426,4	431,3	440,1	464,1	458,2
$T_{вн.с}$, К	343,1	342,4	341,0	338,4	337,6	337,1	339,2	464,1	473,9	473,0
$T_{вст}$, К	1207,0	1204,6	1230,0	1203,8	1167,1	1162,1	1206,8	—	—	—
CO ₂ _{вых}	0,0153	0,0139	0,0147	0,013	0,0079	0,0073	0,0134	0,0097	0,0207	0,0199
H ₂ O _{вых}	0,0126	0,0114	0,012	0,0107	0,0065	0,0059	0,0109	0,00794	0,017	0,0163
V_d , м/с	142,6	141,2	141,9	144,7	144,6	144,2	144,4	143,8	124,5	120,8
$\sigma_{вст}$, МПа	70,7	66,7	65,4	54,2	42,0	47,6	57,7	—	—	—

$Q_{д.вых}$ – количество тепла, выходящее из фурмы с горячим дутьем, кВт; $Q_{в.вых}$ – количество тепла, выходящее из фурмы с водой, кВт; $Q_{реак}$ – количество тепла, выделяющееся в результате реакции горения газа, кВт; $T_{д.вых}$ – температура горячего дутья на выходе из фурмы, К; $T_{в.вых}$ – температура воды на выходе из фурмы, К; $T_{пов.р.тор}$ – температура торцевой поверхности рыльной части со стороны печи, К; $T_{зав}$ – температура в зазоре между вставкой и внутренним стаканом, К; T_p – температура рыльной части, К; $T_{вн.с}$ – температура внутреннего стакана, К; $T_{вст}$ – температура вставки, К; V_d – средняя скорость горячего дутья в дутьевом канале фурмы, м/с; CO₂ _{вых} – массовая доля углекислого газа на выходе из дутьевого канала; H₂O _{вых} – массовая доля воды на выходе из дутьевого канала; $\sigma_{вст}$ – максимальные температурные напряжения во вставке, МПа.

В результате увеличивается количество теплоты за счет реакции горения, а, следовательно, растут тепловой поток и температура на выходе из дутьевого канала. Одновременно увеличивается температура охлаждающей воды и рыльной части, а также напряжения во вставке.

Увеличение длины вставки (вариант 3) сопровождается увеличением количества теплоты, выделившейся

в результате реакции горения по сравнению с вариантом 2, но не достигает значения, получаемого в варианте 1. Таким образом, выступ вставки в дутьевой канал на 2,0 мм оказывает большее влияние на процесс горения природного газа, чем увеличение ее длины на 75 мм. Однако увеличение длины вставки приводит к дополнительному сохранению тепла в дутьевом кана-

ле. В результате тепловой поток и температура дутья на выходе из фурмы превышают соответствующие значения по варианту 1, а температура воды на выходе из фурмы оказываются меньше, чем по вариантам 1 и 2. Поскольку вставка защищает большую долю рыхлой части, то температура вставки повышается, а рыхлой части снижается по сравнению с предыдущими вариантами. Также повышается и температура в материале зазора, отделяющем вставку от внутреннего стакана и рыхлой части. Это свидетельствует о более интенсивных тепловых потоках на стенках дутьевого канала в рыхлой части фурмы.

Сужение дутьевого канала за счет увеличения толщины вставки в варианте 4 приводит к увеличению скорости дутья в нем, что смещает начало области горения в сторону фурменной зоны [17, 18]. Количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения в дутьевом канале, уменьшается, что приводит к снижению всех тепловых и температурных показателей для дутья, воды, медных частей фурмы и вставки.

Увеличение угла между нормалью к стенке внутреннего стакана и осью отверстия для подачи природного газа до 30° (вариант 5) сопровождается тем, что природный газ сильнее прижимается к стенке фурмы потоком горячего дутья. В результате, из-за примерно двукратного уменьшения количества теплоты, выделившейся при реакции горения, снижаются все тепловые и температурные показатели для дутья, воды, медных частей фурмы и вставки (рис. 2 – 4). Температурные напряжения имеют минимальные значения (табл. 4), что должно способствовать повышению стойкости вставки.

Теплота реакции горения хорошо коррелирует с содержанием продуктов реакции в дутье (рис. 5).

Расчеты показали, что выступ удлиненной вставки в дутьевой канал, образованный утонением стенки рыхлой части от места контакта со вставкой до ее торца (вариант 6), приводит к тому, что природный газ сильнее прижимается к стенке и хуже перемешивается с дутьем (рис. 6). В результате снижаются количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения, тепловой поток и температура дутья на выходе из дутьевого канала [19, 20]. Поскольку рыхлая часть стала тоньше, повышается ее температура, что приводит к росту температуры и энтальпии отходящей воды системы охлаждения фурмы (табл. 4). Снижение степени прохождения реакции горения в дутьевом канале подтверждается уменьшением содержания CO_2 и H_2O (табл. 4).

На основании проведенного анализа можно оценить влияние выступа вставки в дутьевой канал на количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа (для различных вариантов конструкции). Так, для варианта с короткой серийной вставкой и при перпендикулярности оси отверстия для подачи природного газа к стенке внутреннего стакана, выступ вставки в дутьевой канал оказывает существенное влияние на повышение количества теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа (см. табл. 4, варианты 1 и 2). А для удлиненной на 75 мм вставки в рыхлую часть фурмы (при сохранении перпендикулярности оси отверстия для подачи природного газа и стенки внутреннего стакана) наличие выступа вставки в дутьевом канале приводит к незначительному повышению количества теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа (см. табл. 4, варианты 4 и 7). При сочетании удлиненной на 75 мм вставки в рыхлую часть фурмы и угла между нормалью к стенке внутреннего стакана

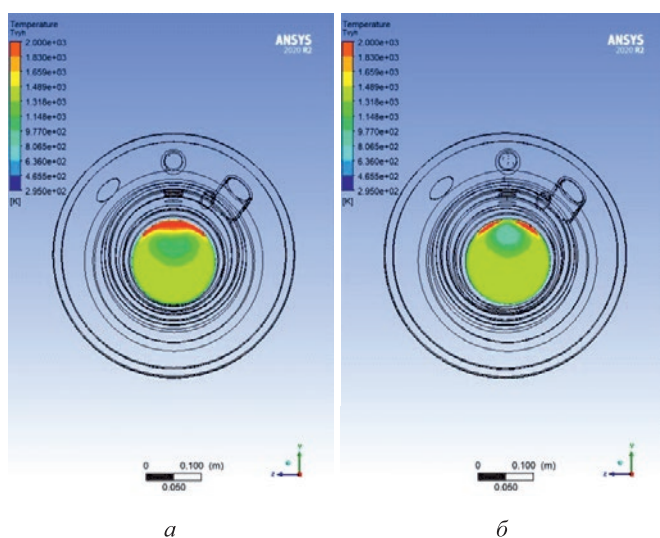


Рис. 2. Распределение температуры дутья на выходе из фурмы:
а – вариант 1; б – вариант 5

Fig. 2. Distribution of blast temperature at the tuyere outlet:
а – option 1; б – option 5

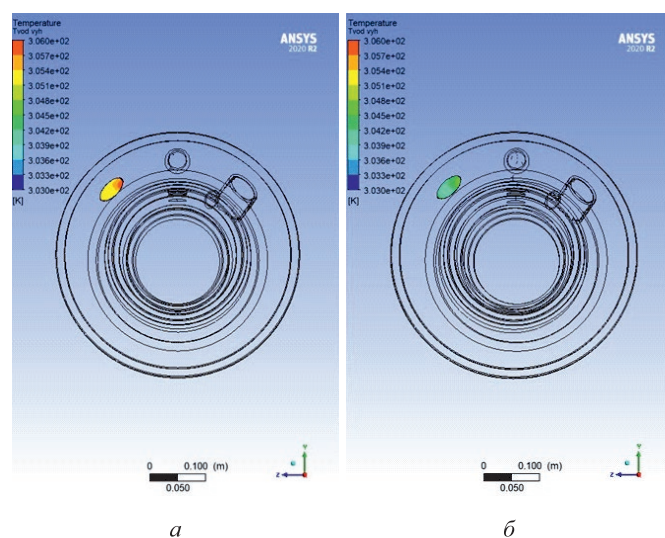


Рис. 3. Распределение температуры воды на выходе из фурмы:
а – вариант 1; б – вариант 5

Fig. 3. Distribution of water temperature at the tuyere outlet:
а – option 1; б – option 5

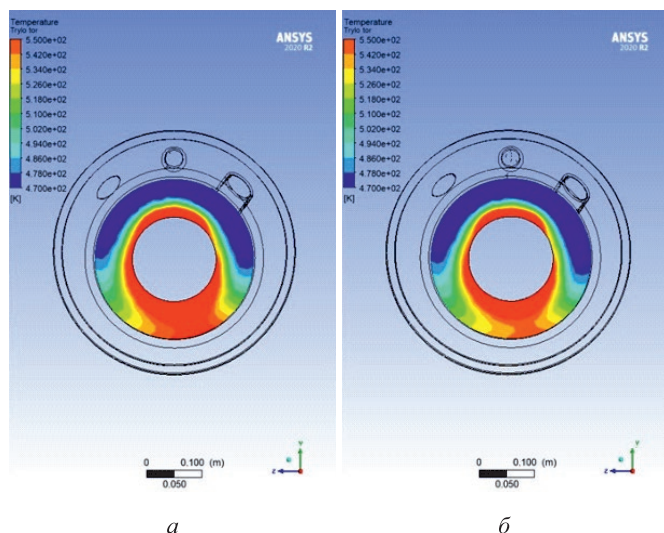


Рис. 4. Распределение температуры торца рыльной части фурмы:
а – вариант 1; б – вариант 5

Fig. 4. Temperature distribution of the tuyere snout end:
а – option 1; б – option 5

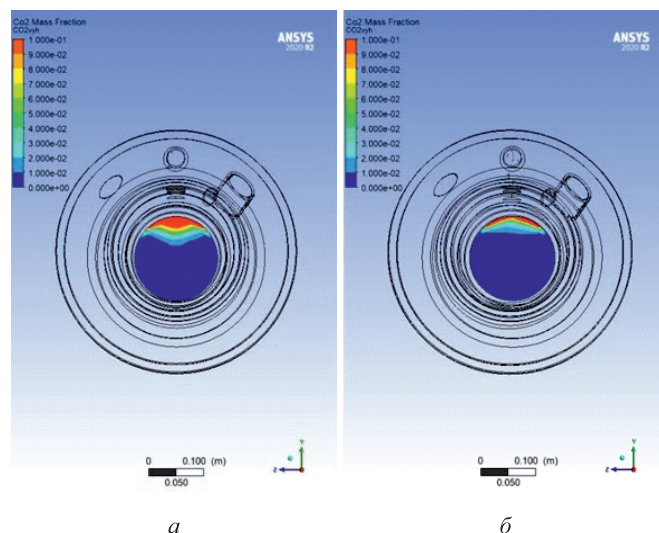


Рис. 5. Распределение массовой доли CO_2 на выходе из фурмы:
а – вариант 1; б – вариант 5

Fig. 5. Distribution of CO_2 mass fraction at the tuyere outlet:
а – option 1; б – option 5

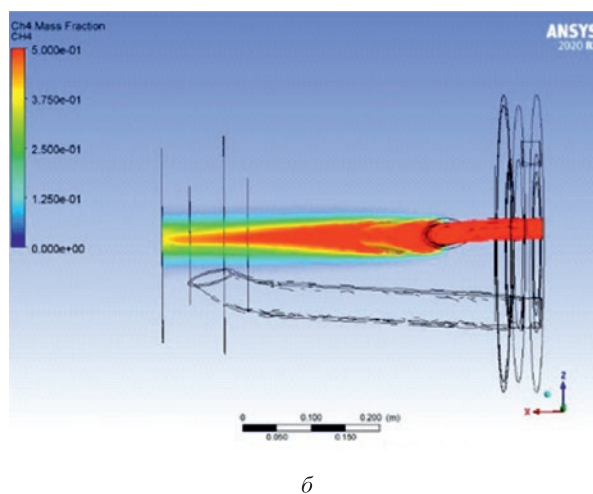
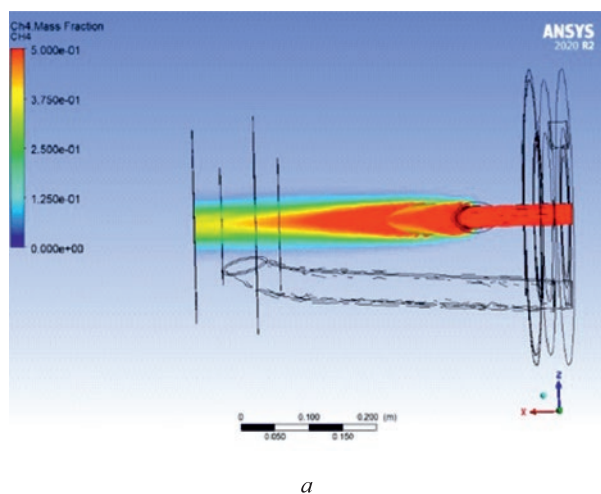


Рис. 6. Распределение массовой доли CH_4 в дутьевом канале фурмы со стороны газовой трубки:
а – вариант 5; б – вариант 6

Fig. 6. Distribution of CH_4 mass fraction in the tuyere blowing channel from the side of gas tube:
а – option 5; б – option 6

и осью отверстия для подачи природного газа, равного 30° , наличие выступа вставки в дутьевом канале приводит к понижению количества теплоты, выделяющейся в реакции горения газа (см. табл. 4, варианты 5 и 6).

Вариант 8 (фурма без вставки) характеризуется значительным повышением температуры внутреннего стакана (более, чем на 120°C), охлаждающей фурму воды (более, чем на $3,2^\circ\text{C}$) и, следовательно, повышением потока теплоты, уносимой водой, на выходе из фурмы (более, чем на 110 кВт) (см. табл. 4, вариант 1).

В случае разрушения серийной вставки (конструкции по варианту 1) образовавшаяся ступенька в рыльной части создает условия для лучшего перемешива-

ния природного газа и горячего дутья, а увеличенная полость дутьевого канала вызывает снижение скорости дутья (вариант 9). Все это приводит к более активному горению газа в дутьевом канале. В результате значительно увеличиваются как тепловой поток, уходящий с дутьем из фурмы, так и тепловые потери через дутьевой канал.

Аналогичная картина складывается и для случая разрушения удлиненной вставки конструкции, соответствующей варианту 4. Однако в этом случае (вариант 10) по сравнению с серийной вставкой (вариант 9) процесс горения газа начинается ближе к выходу из дутьевого канала, а рабочий объем канала становится больше.

В результате теплота, выделяющаяся в результате реакции горения газа, содержание продуктов горения, уносимая уходящим потоком теплота и температура дутья на выходе из фурмы, тепловые потери с охлаждающей водой и температура воды на выходе из фурмы, температура рывальной части, скорость дутья в дутьевом канале для варианта 10 становятся ниже, чем в варианте 9, а температура торца рывальной части – выше.

Следует отметить, что вариант 1 в настоящее время штатно используется, а вариант 5 успешно прошел апробацию на ДП № 4, 5 ПАО «Северсталь»¹.

Выводы

Выступ вставки в дутьевой канал на 2 мм улучшает перемешивание природного газа и дутья, способствует горению газа в дутьевом канале, что приводит к повышению тепловых потерь через дутьевой канал и снижению стойкости вставки.

С заглублением вставки в рывальную часть дополнительно на 75 мм значительно снижаются тепловые потери через дутьевой канал.

Увеличение толщины удлиненной вставки с 10 до 13 мм со стороны фланца с последующим ее утонением до 8 мм по направлению дутья сопровождается увели-

чением скорости дутья, что приводит к уменьшению теплового потока на выходе из дутьевого канала, снижению через него тепловых потерь и повышению стойкости вставки.

Расположение оси отверстия для подачи природного газа под углом 30° относительно нормали к стенке внутреннего стакана приводит к тому, что газ прижимается к стенке вставки потоком горячего дутья, что вызывает снижение температуры потока дутья и повышение стойкости вставки, как и при увеличении толщины вставки.

Область расширения дутьевого канала, образовавшаяся после разрушения вставок, способствует активному горению газа в дутьевом канале, что приводит к значительному увеличению теплового потока, уходящего с дутьем из фурмы.

Для повышения стойкости вставки и снижения тепловых потерь через дутьевой канал следует рекомендовать удлиненную вставку переменной толщины, изменяющейся с 13 до 8 мм по направлению дутья, не выступающую в дутьевой канал, имеющую угол между нормалью к стенке внутреннего стакана и осью отверстия для подачи природного газа 30° (вариант 5).

Для получения максимального теплосодержания дутья предпочтителен вариант с удлиненной вставкой переменной толщины, изменяющейся с 10 до 8 мм по направлению дутья, и осью отверстия для подачи природного газа, перпендикулярной стенке внутреннего стакана (вариант 3).

¹ В работе принимали участие Е.А. Волков, А.Л. Теревов, Р.Н. Максимов, В.В. Сухановский, Е.А. Никонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Бородулин А.В., Васильев А.П., Глущенко Е.Л. и др. Об информативности тепловых потерь рабочего пространства доменных печей // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». Москва: МИСиС, 2002. С. 424–426.
2. Бондаренко А.А., Горбик А.С., Дышлевич Г. Г. Исследование теплонапряженности различных участков фурм // Сталь. 1983. № 7. С. 11–12.
3. Dai B., Long H.-M., Ji Y.-L., Rao J.-T., Liu Y.-C. Theoretical and practical research on relationship between blast air condition and hearth activity in large blast furnace // Metallurgical Research and Technology. 2020. Vol. 117. No. 1. Article 113. <https://doi.org/10.1051/metal/2020007>
4. Song L., Xiaojie L., Qing L., Xusheng Z., Yana Q. Study on the appropriate production parameters of a gas-injection blast furnace // High Temperature Materials and Processes. 2020. Vol. 39. No. 1. P. 10–25. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0005>
5. Пат. № 2779514 B2 2240207 A JP, C21B7/16. Фурма для доменной печи / А. Kikuo (JP). № 8960188; заявлено 13.03.89.
6. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Моделирование теплового состояния воздушных фурм доменных печей // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 9. С. 622–627. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-622-627>
7. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Скрипаленко М.М. Моделирование температурного поля воздушных фурм доменных печей с помощью DEFORM 2D // Металлург. 2016. № 10. С. 14–17.
8. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Тарасов Ю.С., Сидорова Т.Ю. Снижение тепловых потерь на воздушных фурмах доменных печей
1. Borodulin A.V., Vasil'ev A.P., Glushchenko E.L., etc. On informative value of heat losses in working space of blast furnaces. In: *Proceedings of the Second Int. Conf. "Automated Furnace Systems and Energy-Saving Technologies in Metallurgy"*. Moscow: MISIS, 2002, pp. 424–426. (In Russ.).
2. Bondarenko A.A., Gorbik A.S., Dyshlevich G.G. Investigation of heat stress of various parts of the tuyeres. *Stal'*. 1983, no. 7, pp. 11–12. (In Russ.).
3. Dai B., Long H.-M., Ji Y.-L., Rao J.-T., Liu Y.-C. Theoretical and practical research on relationship between blast air condition and hearth activity in large blast furnace. *Metallurgical Research and Technology*. 2020, vol. 117, no. 1, article 113. <https://doi.org/10.1051/metal/2020007>
4. Song L., Xiaojie L., Qing L., Xusheng Z., Yana Q. Study on the appropriate production parameters of a gas-injection blast furnace. *High Temperature Materials and Processes*. 2020, vol. 39, no. 1, pp. 10–25. <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0005>
5. Kikuo A. *Tuyere for a blast furnace*. Patent no. 2779514 B2 2240207 A JP, C21B7/16, no. 8960188.
6. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Sidorova T.Yu. Modeling of the thermal state of air tuyeres for blast furnaces. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 622–627. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-622-627>
7. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Skripalenko M.M. Modeling of the temperature field of blast furnace tuyeres using Deform-2D Software. *Metallurgist*. 2017, vol. 60, no. 9–10, pp. 1011–1015. <https://doi.org/10.1007/s1015-017-0400-5>
8. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Tarasov Yu.S., Sidorova T.Yu. Decreasing the heat losses at the air tuyeres in blast furnaces. *Steel in*

- путем теплоизоляции дутьевого канала // *Сталь*. 2019. № 4. С. 7–10.
9. Волков Е.А., Радюк А.Г., Теребов А.Л., Титлянов А.Е. Повышение эффективности работы теплоизолирующих вставок в дутьевом канале воздушных фурм доменных печей // *Металлург*. 2021. № 4. С. 5–8.
 10. Денисов М.А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование: Учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 149 с.
 11. Денисов М.А. Компьютерное проектирование. ANSYS: Учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. 77 с.
 12. Xu H., Sun C., Liao Z., Xu J., Kou M. Numerical simulation of temperature and stress distributions inside the furnace tuyere // *Proceedings for the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking, STEELSIM 2019*. 2019. P. 51–55. <http://doi.org/10.33313/503/005>
 13. Liu X., Tang G., Okosun T., Silaen A.K., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of heat transfer phenomena in blast furnace Tuyere/Blowpipe region // *ASME 2017 Heat Transfer Summer Conference*. Paper No. HT2017-4961, V001T02A007. 8 p. <https://doi.org/10.1115/HT2017-4961>
 14. Zhu J., Jin Y., Luo X., Ye C., Yuan H., Ai F. Simulation of size of tuyere raceway and the tuyere blast volume distribution for blast furnace // *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Non-ferrous Alloys*. 2017. Vol. 37. No. 3. P. 253–257. <http://doi.org/10.15980/j.tzzz.2017.03.006>
 15. Pistorius P.C., Gibson J., Jampani M. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: Tuyere injection, shaft injection and prereduction // *Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies*. Wang S., Free M., Alam S., Zhang M., Taylor P. eds. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. P. 283–292. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_26
 16. Li Y.-L., Cheng S.-S., Chen C. Mathematical model of adjusting blast volume of blast furnace tuyeres // *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*. 2016. Vol. 37. No. 3. P. 357–362. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3026.2016.03.012>
 17. Dong Z., Wang J., Zuo H., She X., Xue Q. Analysis of gas-solid flow and shaft-injected gas distribution in an oxygen blast furnace using a discrete element method and computational fluid dynamics coupled model // *Particuology*. 2017. Vol. 32. P. 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.07.008>
 18. Jiang J., Zhu R., Qiu S. Effect of CO₂ injection into blast furnace tuyeres on the pulverized coal combustion // *High Temperature Materials and Processes*. 2021. Vol. 40. No. 1. P. 131–140. <https://doi.org/10.1515/htmp-2021-0018>
 19. Murao A., Fukada K., Matsuno H., Sato M., Akaotsu S., Saito Y., Matsushita Y., Aoki H. Effect of natural gas injection point on combustion and gasification efficiency of pulverized coal under blast furnace condition // *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 2018. Vol. 104. No. 5. P. 243–252. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-087>
 20. Chai Y.-F., Zhang J.-L., Shao Q.-J., Ning X.-J., Wang K.-D. Experiment research on pulverized coal combustion in the tuyere of oxygen blast furnace // *High Temperature Materials and Processes*. 2019. Vol. 38. P. 42–49. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0141>
- Translation*. 2019, vol. 49, no. 4, pp. 257–260. <https://doi.org/10.3103/S0967091219040119>
9. Volkov E.A., Radyuk A.G., Terebov A.L., Titlyanov A.E. Increasing the operational efficiency of insulation liners in the air passage of blast-furnace tuyeres. *Metallurgist*. 2021, vol. 65, no. 3–4, pp. 363–367. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01165-2>
 10. Denisov M.A. *Mathematical Modeling of Thermophysical Processes. ANSYS and CAE-design: Manual*. Yekaterinburg: UrFU, 2011, 149 p. (In Russ.).
 11. Denisov M.A. *Computer Design. ANSYS: Manual*. Yekaterinburg: UrFU, 2014, 77 p. (In Russ.).
 12. Xu H., Sun C., Liao Z., Xu J., Kou M. Numerical simulation of temperature and stress distributions inside the furnace tuyere. *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking, STEELSIM 2019*, 2019, pp. 51–55. <http://doi.org/10.33313/503/005>
 13. Liu X., Tang G., Okosun T., Silaen A.K., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of heat transfer phenomena in blast furnace Tuyere/Blowpipe region. *ASME 2017 Heat Transfer Summer Conf.*, paper no. HT2017-4961, V001T02A007, 8 p. <https://doi.org/10.1115/HT2017-4961>
 14. Zhu J., Jin Y., Luo X., Ye C., Yuan H., Ai F. Simulation of size of tuyere raceway and the tuyere blast volume distribution for blast furnace. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Non-ferrous Alloys*. 2017, vol. 37, no. 3, pp. 253–257. <http://doi.org/10.15980/j.tzzz.2017.03.006>
 15. Pistorius P.C., Gibson J., Jampani M. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: Tuyere injection, shaft injection and prereduction. In: *Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies*. Wang S., Free M., Alam S., Zhang M., Taylor P. eds. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham, pp. 283–292. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_26
 16. Li Y.-L., Cheng S.-S., Chen C. Mathematical model of adjusting blast volume of blast furnace tuyeres. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*. 2016, vol. 37, no. 3, pp. 357–362. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3026.2016.03.012>
 17. Dong Z., Wang J., Zuo H., She X., Xue Q. Analysis of gas-solid flow and shaft-injected gas distribution in an oxygen blast furnace using a discrete element method and computational fluid dynamics coupled model. *Particuology*. 2017, vol. 32, pp. 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.07.008>
 18. Jiang J., Zhu R., Qiu S. Effect of CO₂ injection into blast furnace tuyeres on the pulverized coal combustion. *High Temperature Materials and Processes*, 2021, vol. 40, no. 1, pp. 131–140. <https://doi.org/10.1515/htmp-2021-0018>
 19. Murao A., Fukada K., Matsuno H., Sato M., Akaotsu S., Saito Y., Matsushita Y., Aoki H. Effect of natural gas injection point on combustion and gasification efficiency of pulverized coal under blast furnace condition. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 2018, vol. 104, no. 5, pp. 243–252. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2017-087>
 20. Chai Y.-F., Zhang J.-L., Shao Q.-J., Ning X.-J., Wang K.-D. Experiment research on pulverized coal combustion in the tuyere of oxygen blast furnace. *High Temperature Materials and Processes*. 2019, vol. 38, pp. 42–49. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0141>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сардорбек Дилшод угли Сайфуллаев, магистрант кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0003-4012-1782
E-mail: tgtu1@mail.ru

Sardorbek D. Saifullaev, MA Student of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)
ORCID: 0000-0003-4012-1782
E-mail: tgtu1@mail.ru

Сергей Валерьевич Албул, старший преподаватель кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0003-1802-7378

E-mail: albul@isis.ru

Олег Анатольевич Кобелев, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», главный специалист ГК «РОСАТОМ», Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

E-mail: oakobelev@cniitmash.com

Игорь Анисимович Левицкий, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: lewwwis@mail.ru

Александр Германович Радюк, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0001-6758-9911

E-mail: radjuk@rambler.ru

Александр Евгеньевич Титлянов, к.т.н., старший научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: radjuk@rambler.ru

Sergei V. Albul, Senior Lecturer of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0003-1802-7378

E-mail: albul@isis.ru

Oleg A. Kobelev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Chief Specialist of State Corporation “ROSATOM”, JSC Russian State Research Center “CNIITMASH”

E-mail: oakobelev@cniitmash.com

Igor’ A. Levitskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

E-mail: lewwwis@mail.ru

Aleksandr G. Radyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Leading Researcher of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0001-6758-9911

E-mail: radjuk@rambler.ru

Aleksandr E. Titlyanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

E-mail: radjuk@rambler.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Сайфуллаев С.Д. – проведение расчетов и моделирования.

Албул С.В. – анализ результатов исследований, подготовка текста.

Кобелев О.А. – научное руководство, формирование выводов.

Левицкий И.А. – постановка целей и задач исследования, научное консультирование.

Радюк А.Г. – постановка целей и задач исследования, анализ исследования, подготовка текста.

Титлянов А.Е. – формирование концепции, научное руководство.

S.D. Saifullaev – calculations and modeling.

S.V. Albul – analysis of the research results, preparation of the text.

O.A. Kobelev – scientific leadership, the formation of conclusions.

I.A. Levitskii – setting the research goals and objectives, scientific consulting.

A.G. Radyuk – setting the research goals and objectives, research analysis, preparation of the text.

A.E. Titlyanov – concept formation, scientific leadership.

Поступила в редакцию 01.07.2021

После доработки 25.08.2021

Принята к публикации 25.11.2021

Received 01.07.2021

Revised 25.08.2021

Accepted 25.11.2021