

**Русанов И. Ф., \*Куберский С. В., Кононенко Г. И., Зелинская Н. А.**

*Донбасский государственный технический университет*

*E-mail: Skuberskiy@yandex.ru*

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СЛОЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

*Приведены результаты лабораторных исследований влияния способов формирования столба шихтовых материалов доменной плавки на его газодинамическое сопротивление. Рассмотрены варианты загрузки агломерата различного ситового состава, слоями, агломерата и кокса послойно и с их предварительным перемешиванием. Установлено, что на границе слоев материалов, различающихся по крупности и однородности, изменяются газодинамические условия, что приводит к снижению или увеличению газодинамического сопротивления столба материалов в зависимости от величины обобщенных характеристик ситового состава материалов.*

**Ключевые слова:** агломерат, ситовый состав, кокс, газодинамическое сопротивление, слой, послойная загрузка, предварительное смешивание, рудная нагрузка.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В практике ведения доменной плавки широко применяются различные способы загрузки шихтовых материалов [1–7]. Их влияние на распределение материалов и газов по сечению печи достаточно хорошо рассмотрено во многих научных публикациях [8–11].

В последние годы получила развитие теория «коксовых окон» при прохождении газов через слой пластического состояния железосодержащих компонентов шихты [12]. Эта теория предполагает, что поток газа в верхние горизонты шихты проходит через прослойки кокса при практической газонепроницаемости слоев пластического состояния агломерата и окатышей. Известно, что одним из способов ликвидации канального хода доменной печи является загрузка холостых подач с целью выравнивания газораспределения по сечению доменной печи.

В соответствии с теорией коксовых окон наиболее благоприятной для доменной плавки является  $\Lambda$ -образная форма пластической зоны [13]. Форма пластической зоны является функцией распределения газового потока по сечению доменной печи. Для образования  $\Lambda$ -образной формы зоны когезии необходимо организовать

преимущественное развитие газового потока в осевой части доменной печи, что обеспечивается соответствующим распределением шихтовых материалов при их загрузке в доменную печь [14–16].

Однако, как показал литературный и патентный поиск, к настоящему времени практически отсутствует анализ влияния условий формирования слоя различающихся по крупности и однородности шихтовых материалов на его газодинамическое сопротивление.

**Постановка задачи.** Важными и недостаточно изученными вопросами доменного производства являются исследования влияния многослойной загрузки материалов различной крупности на общее газодинамическое сопротивление слоя, а также зависимость газопроницаемости слоя агломерата и кокса при послойной загрузке и с предварительным перемешиванием материалов. Также не рассмотрен вариант загрузки шихты слоями с переменной рудной нагрузкой.

По имеющимся производственным данным сделать такой анализ не представляется возможным.

Поэтому основная *цель* настоящих исследований заключалась в анализе изменения газопроницаемости слоя шихты при

различных способах ее загрузки с использованием лабораторных экспериментов.

**Задачей** работы являлось исследование в лабораторных условиях влияния способов формирования столба шихтовых материалов различного ситового состава на его газодинамическое сопротивление.

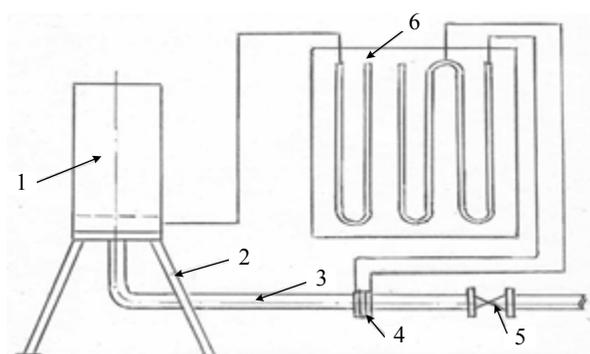
**Объект исследования** — процесс движения воздуха в многослойном столбе материалов, отличающихся ситовым составом.

**Предмет исследования** — влияние различных способов формирования столба шихтовых материалов различного ситового состава на его газодинамическое сопротивление.

**Методика исследования.** Исследование газодинамики слоя неоднородного сыпучего материала при различной его структуре проводилось с использованием лабораторной установки, представленной на рисунке 1.

Воздух в аэродинамический цилиндр диаметром 100 мм и высотой 400 мм подавался от компрессора. Расход воздуха определялся при помощи измерительной диафрагмы и регулировался в пределах 3,6–29,3 м<sup>3</sup>/ч. При этом скорость воздуха на пустое сечение изменялась от 0,1 до 1,1 м/с. Давление воздуха в трубопроводе перед сужающим устройством, падение давления на диафрагме и перепад давления в слое материала ( $\Delta P$ ) замерялись с использованием дифференциальных манометров в миллиметрах водяного столба, а затем полученные экспериментальные данные пересчитывались на общую высоту слоя, равную 1 м, и переводились в Па.

В исследованиях использовались мелкий агломерат и кокс, ситовый состав которых по многообразию фракций был подобен промышленному. При моделировании ситового состава промышленного агломерата и кокса по методике, описанной в работе [17], их крупность  $d_{cp}$  была уменьшена в 5 раз, а коэффициент вариации размера кусков  $\nu$  (коэффициент неоднородности) оставлен без изменения. Соотношение между отдельными фракциями устанавливалось в соответствии с распределением Вейбулла [18].



1 — аэродинамический цилиндр; 2 — подставка; 3 — труба воздухопровода; 4 — измерительная диафрагма; 5 — регулирующий вентиль; 6 — дифференциальный манометр

Рисунок 1 — Экспериментальная установка

Ситовый состав всех исследованных материалов и их статистические характеристики приведены в таблице 1. В качестве основного варианта ситового состава материалов при моделировании выбраны материалы со следующими значениями обобщенных характеристик: агломерат —  $d_{cp}=4,0$  мм,  $\nu=0,6$ ; кокс —  $d_{cp}=10$  мм,  $\nu=0,25$  (для промышленного агломерата  $d_{cp}=20$  мм,  $\nu=0,6$ , а кокса  $d_{cp}=50$  мм,  $\nu=0,25$ ).

При исследовании газодинамики слоя сыпучих материалов важное значение имеет их загрузка в аэродинамический цилиндр. Известно [19], что даже для слоя из одинаковых шаров в зависимости от способа их укладки порозность слоя, являющаяся одной из основных его характеристик, может изменяться более чем в два раза.

Таблица 1  
Обобщенные параметры исследованных материалов

№	Содержание фракций, %				Параметр	
Кокс						
1	<5	5–10	10–15	>15	$d_{cp}$	$\nu$
	2,5	48,7	50,6	1,2	10,0	0,25
Агломерат						
1	<3	3–5	3–10	>10	$d_{cp}$	$\nu$
	39,9	30,7	28,0	1,8	4,0	0,60
2	33,4	33,3	33,3	-	4,6	0,48
3	-	33,3	33,3	33,4	8,0	0,44

Погрешность замеров при различной загрузке объясняется тем, что в результате нее материал сегрегирует и образуется слой с участками различной газопроницаемости. В данной работе загрузка осуществлялась порциями массой от 0,3 до 2,0 кг каждая в зависимости от количества загружаемых слоев. При этом каждая порция материала формировалась взвешиванием отдельных фракций, взятых в соответствии с расчетом ситового состава материала по распределению Вейбулла.

Затем каждая фракция последовательно равномерно распределялась по площади жесткого листа тонкой резины, который сворачивался в трубку, и материал высыпался в установку. Равномерное распределение отдельных фракций агломерата при составлении порций материала и их малая масса позволили снизить сегрегацию по объему аэродинамической установки.

В конце каждой загрузки перед продувкой материала измерялась высота его слоя в установке и фиксировались атмосферное давление и температура окружающей среды.

При продувке слоя определялась зависимость  $\Delta P$  в слое от расхода воздуха на пустое сечение установки.

Для оценки газопроницаемости слоя использовалось уравнение вида [20]

$$\Delta P = K_1 \cdot \mu \cdot \omega + K_2 \cdot \rho \cdot \omega^2, \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{A}{\varepsilon^3} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varphi \cdot d_{cp}} \right)^2, \quad K_2 = \frac{B}{\varepsilon^3} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varphi \cdot d_{cp}} \right);$$

где  $\Delta P$  — перепад давления в слое, Па;  $d_{cp}$  — средний эквивалентный диаметр частиц, м;  $\varphi$  — коэффициент формы частиц;  $\varepsilon$  — порозность слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\rho$  — плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  — приведенная скорость движения газа через слой, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости воздуха, кПа·с;  $K_1$  и  $K_2$  — эмпирические коэффициенты, характеризующие ламинарную и турбулентную составляющие газового потока соответственно.

Как установлено в работе [20], коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  тесно связаны с обобщенными характеристиками ситового состава материала  $d_{cp}$  и  $v$ :

$$K_1 \cdot 10^{-5} = \left( \frac{4,9}{d_{cp}} \right)^2 + 2,6 \cdot d_{cp}^{0,25} [f(v) - 1], \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{10,4}{d_{cp}} \cdot f^2(v),$$

$$\text{где } f(v) = \left[ 1 + \left( \frac{v}{v_0} \right) \right]^{1/8}.$$

**Изложение материала.** В современных условиях загрузка доменных печей осуществляется отдельными порциями, в которых порции кокса и железорудных материалов чередуются определенным образом.

Такая загрузка приводит к образованию слоевой структуры столба шихты. Количество отдельных слоев и их толщина определяются величиной подачи. Размер подачи в реальных условиях, по технологическим соображениям, обычно изменяется на 12–14 %, поэтому количество слоев может отличаться в 1,1–1,2 раза.

Как установлено в работе [5], на границе резко очерченных слоев с разными газодинамическими свойствами возникают местные потери, аналогично потерям, возникающим при переходе газа из труб одного диаметра в другой. На величину местных потерь давления в межслойной зоне оказывают влияние количество дутья, соотношение видов шихты, соотношение диаметров кусков, составляющих разные слои, и порядок укладки шихты. Причем наибольшее влияние оказывают первые два фактора.

Учитывая изложенное, определенный интерес представляет изучение потерь давления газа при многослойной структуре слоя.

С целью изучения газодинамического сопротивления слоя, состоящего из разного количества последовательно загружаемых порций материала различной крупности, был проведен ряд лабораторных экспериментов.

**МЕТАЛЛУРГИЯ**

В первой серии экспериментов определялось сопротивление слоя, состоящего из различного количества (3, 6, 12 и 24) последовательно загружаемых равных порций отдельных фракций агломерата крупностью, мм: 3–5, 5–10, 10–15 ( $d_{cp} = 8$  мм).

Общая масса каждой фракции во всей серии составляла 2 кг. Масса слоя от опыта к опыту изменялась путем деления указанной массы на 3, 6, 12, и 24 порции.

Во второй серии опытов аналогичные измерения проводились при загрузке фракций агломерата крупностью, мм: 1,5–3; 3–5 и 5–10 ( $d_{cp} = 4,6$  мм) для 3, 6, 9 и 18 слоев.

Порядок загрузки отдельных фракций во всех опытах сохранялся неизменным (фракции загружались в порядке увеличения их размера). В результате анализа полученных данных установлено, что с ростом количества слоев в обоих случаях общий  $\Delta P$  в слое увеличивался (рис. 2 и 3).

Рост  $\Delta P$  при увеличении числа слоев происходит в результате одновременного роста и ламинарной, и турбулентной составляющих воздушного потока. При этом значение коэффициента  $K_2$  в уравнении (1) для более мелкого материала возрастает в большей степени, чем значение коэффициента  $K_1$ . При увеличении числа слоев в 6 раз значение коэффициента  $K_1$  возрастает в 1,5 раза, а  $K_2$  в 2,2 раза.

Для крупного материала  $K_2$  возрастает только в 1,2 раза при том же росте  $K_1$ . Следует также отметить, что с увеличением числа отдельных слоев общая высота всего слоя в целом уменьшается.

Очевидно, объясняется это тем, что даже при загрузке однородного материала одной фракции на другую четкого различия их границ нет. Поскольку поверхность предыдущего слоя рельефная, агломерат последующего слоя при загрузке частично проникает в неровности, в результате чего их пограничную зону следует считать зоной образования смеси агломерата соседних слоев.

С увеличением количества слоев суммарная толщина зон образования смеси

соседних агломератов увеличивается, что приводит к росту газодинамического сопротивления всего слоя.

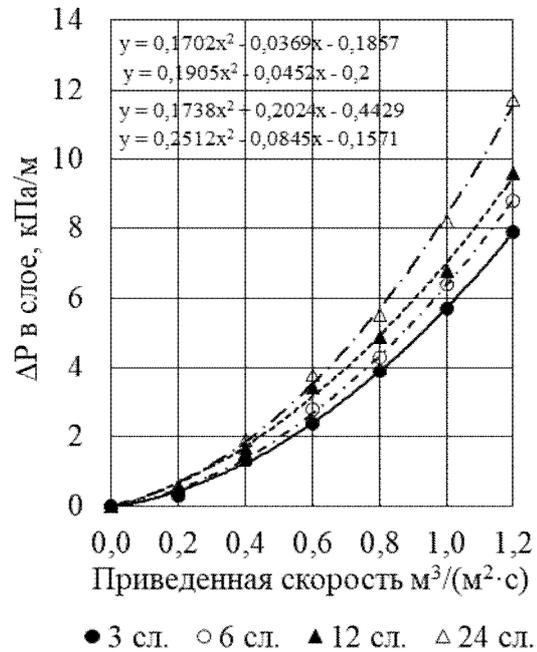


Рисунок 2 — Влияние количества слоев на  $\Delta P$  при  $d_{cp} = 4,6$

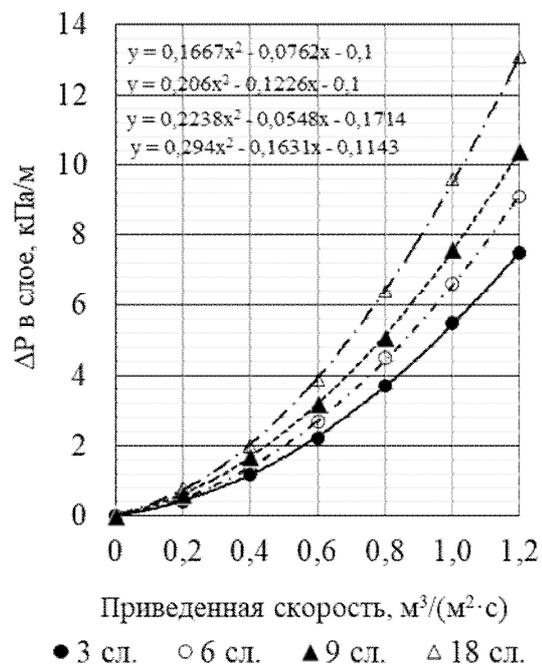


Рисунок 3 — Влияние количества слоев на  $\Delta P$  при  $\bar{d} = 8$  мм

О справедливости изложенных выше представлений свидетельствует ряд экспериментов и расчетов. В частности, была определена зависимость  $\Delta P$  воздуха от приведенной его скорости для каждой фракции отдельно и их смесей.

По установленным зависимостям, с использованием данных о насыпной массе и общей массе каждого слоя, сделан расчет теоретического изменения  $\Delta P$  от скорости воздуха для агломерата, состоящего из 3-х слоев. Результаты расчета при последовательном суммировании  $\Delta P$  для 3-х слоев при общей высоте слоя, равной 0,3 м, приведены в таблице 2.

Сравнение рассчитанных и экспериментальных данных зависимости  $\Delta P$  в слое от скорости воздуха показало их хорошую сходимость. Для зависимости  $\Delta P_p$  от приведенной скорости воздуха коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  оказались равны 1,09 и 4,42, а для  $\Delta P_s$  — 1,29 и 4,39 соответственно.

Анализ выполненных расчетов и экспериментальных данных свидетельствует о том, что значения расчетных и экспериментальных коэффициентов достаточно близки.

Таким образом, при послойной загрузке узких фракций агломерата в межслоевой зоне образуется их смесь, что приводит к увеличению газодинамического сопротивления и тем значительнее, чем больше таких зон.

При загрузке шихтовых материалов в доменную печь подачами, в состав которых входит агломерат и кокс, в печи образуются последовательно расположенные слои этих материалов. Толщина слоев зависит от целого ряда факторов, в том числе и от величины рудной нагрузки, т. е. от соотношения в подаче рудных материалов (А) и кокса (К). Порядок загрузки материалов может быть разным, но независимо от этого в печи образуются пограничные слои КА и АК.

В работе определялись зависимости  $\Delta P$  в слое от расхода воздуха при разной рудной нагрузке при послойной загрузке материалов. Ситовый состав кокса и использованного в этой серии экспериментов агломерата (№ 1) приведены в таблице 1.

Таблица 2

Суммарный  $\Delta P$  воздуха при послойной загрузке 3-х слоев агломерата

$\Delta P$ , кПа	Скорость движения газа, м/с					
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$\Delta P_s$	0,12	0,35	0,68	1,11	1,64	2,27
$\Delta P_p$	0,11	0,33	0,64	1,06	1,59	2,21
$\Delta P_s - \Delta P_p$	0,01	0,02	0,03	0,05	0,05	0,06
%	8,06	6,57	5,02	4,07	3,06	2,78

Загрузка материалов в установку велась порциями, в состав которых входил кокс и агломерат. Всего загружалось 6 порций. Во всех опытах при послойной загрузке материала использовалась система загрузки КА. В базовом опыте рудная нагрузка составляла 3,45. Во втором опыте, при сохранении общей рудной нагрузки, равной 3,45, доля агломерата в соседних порциях была изменена в соотношении 1,25. При этом рудная нагрузка в соседних слоях составляла 3,9 и 3,1. В третьем опыте разница между нагрузками в соседних порциях была увеличена и составляла 4,14 и 2,76 (соотношение 1,5).

В целом количество агломерата во всех опытах оставалось постоянным. При такой организации экспериментов изменялась лишь толщина отдельных слоев материала, а количество межслоевых границ и общая высота слоя оставались неизменными.

Полученные данные обрабатывались по приведенной ранее методике. В результате анализа этих данных установлено, что общий  $\Delta P$  в слое при послойной загрузке не зависит от рудной нагрузки в отдельных порциях материала, т. е. при перераспределении рудной нагрузки в подаче при послойной загрузке отдельно кокса и агломерата увеличения газопроницаемости всего столба в целом не наблюдается.

Улучшение же показателей доменной плавки при работе на переменной рудной нагрузке, наблюдающееся на практике, является следствием только более равномерного распределения материалов и газов по радиусу доменной печи.

Расчетом установлено (табл. 3), что  $\Delta P$  в слое при раздельной загрузке кокса и агломерата складывается из  $\Delta P$  в слое кокса, агломерата и пограничной зоне между коксом и агломератом.

По ситовому составу агломерат и скиповый кокс существенно различаются. Средняя крупность кусков агломерата  $d_{cp}$  равна 18 мм, а кокса — около 60 мм.

При этом агломерат по крупности менее однороден, чем кокс ( $\nu$  для агломерата равна 0,77, а кокса — 0,28) [19].

При загрузке агломерата на кокс мелкие его фракции частично заполняют пустоты между отдельными кусками кокса. В этой зоне образуется смесь кокса и агломерата, состоящая из примерно равных объемных их частей. При этом образуется пограничный слой с пониженным газодинамическим сопротивлением.

При загрузке кокса на агломерат смешивание не происходит.

Сравнение экспериментальной и расчетной кривых зависимости общего  $\Delta P$  в слое от скорости воздуха для рудной нагрузки 3,45 дает хорошее их согласование.

При перераспределении рудной нагрузки между соседними порциями загружаемых материалов наблюдается снижение газодинамического сопротивления слоя. Очевидно, это вызвано тем, что при снижении рудной нагрузки или же ее увеличении материал в каждой порции становится более однородным, чем при одинаковой нагрузке по всей высоте слоя. Так как однородность материала является более важной его характеристикой с точки зрения газодинамики [19], то ее повышение и приводит к снижению газодинамического сопротивления.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных также показывает их хорошую сходимость. Для зависимости  $\Delta P_p$  от приведенной скорости воздуха коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  оказались равны 1,65 и 6,78, а для  $\Delta P_s$  — 1,32 и 6,89 соответственно.

В 70-е годы В. И. Логинов предложил загружать шихтовые материалы в домен-

ную печь предварительно смешивая их в скипе [21, 22]. При такой загрузке наблюдается значительное улучшение показателей доменной плавки [23]. Это является следствием улучшения газопроницаемости столба шихтовых материалов и более равномерного их распределения по сечению доменной печи.

В работе также была сделана оценка влияния такого способа формирования структуры слоя на его газопроницаемость. С этой целью исследовано изменение  $\Delta P$  в слое в зависимости от скорости воздуха для смеси агломерата и кокса при разной рудной нагрузке в последовательно загружаемых порциях. При этом рудная нагрузка изменялась так же, как и при послыной загрузке материалов: первоначально рудная нагрузка во всех порциях материала составляла 3,45, а затем она была перераспределена между соседними порциями в отношении 1,25 и 1,50.

Как следует из сравнения результатов исследований, представленных на рисунке 4 во всех случаях газопроницаемость столба материалов с предварительным их перемешиванием выше.

Загрузка шихты, состоящей из агломерата и кокса, с предварительным перемешиванием материалов уменьшает ее сопротивление проходу газа, создает условия для более полного контакта газа с шихтой, способствует улучшению косвенного восстановления окислов железа.

Таблица 3

Суммарный  $\Delta P$  воздуха при послыной загрузке кокса и агломерата (для рудной нагрузки 3,45)

$\Delta P$ , кПа	Скорость движения газа, м/с					
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$\Delta P_{экс}$	0,19	0,57	1,12	1,84	2,73	3,81
$\Delta P_{рас}$	0,17	0,53	1,05	1,76	2,65	3,71
$\Delta P$	0,02	0,04	0,06	0,07	0,08	0,10
%	9,38	7,72	5,65	3,92	2,93	2,52

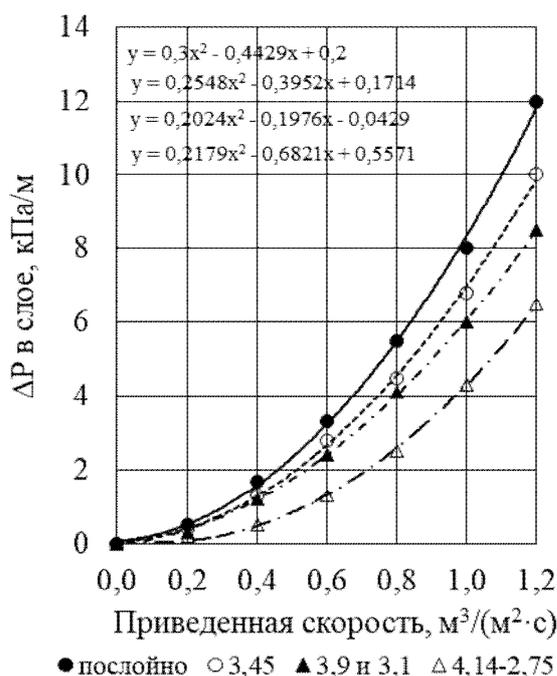


Рисунок 4 — Зависимость  $\Delta P$  от скорости воздуха для различных вариантов совместной загрузки агломерата и кокса

Таким образом, для улучшения газопроницаемости слоя шихтовых материалов может быть рекомендована совместная загрузка кокса и агломерата. При этом целесообразно загрузку вести с перераспределением рудной нагрузки между последовательно загружаемыми порциями материалов.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

#### Список источников

1. Большаков В. И. Теория и практика загрузки доменных печей. М. : Металлургия, 1990. 256 с.
2. Русских В. П., Аленгос М. А., Степнов Д. К. Исследование влияния систем загрузки шихтовых материалов на распределение газового потока в доменной печи // Вестник ПГТУ. 2009. Вып. 19. С. 21–24.
3. Влияние массы железорудной подачи на технико-экономические показатели доменной плавки / В. П. Лялюк [и др.] // Бюллетень «Черная металлургия». 2010. № 11. С. 29–34.
4. Реализация энергосберегающей технологии загрузки современной доменной печи в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях / В. И. Большаков [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 6. С. 6–14.
5. Ковшов В. Н., Петренко В. А. Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи. Днепропетровск : Институт технологии, 1996. 124 с.
6. Модельная система выбора и корректировки программ загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ / Ю. С. Семенов [и др.] // Металлург. 2012. № 9. С. 36–40.

Общее газодинамическое сопротивление всего столба шихтовых материалов тем выше, чем больше образуется межслоевых зон.

При послыйной загрузке узких фракций агломерата на границе двух слоев образуется межслоевая зона, представляющая собой смесь соседних фракций. В результате наблюдается рост газодинамического сопротивления по сравнению с загрузкой этих же фракций в смеси.

Загрузка агломерата и кокса с предварительным смешиванием позволяет повысить газопроницаемость слоя.

При послыйной загрузке кокса и агломерата перераспределение рудной нагрузки между соседними порциями материала не приводит к улучшению газодинамических условий.

Перераспределение рудной нагрузки при загрузке агломерата и кокса с предварительным смешиванием позволяет дополнительно снизить газодинамическое сопротивление слоя. При этом загрузку целесообразно вести с перераспределением рудной нагрузки между последовательно загружаемыми порциями в соотношении 1,2–1,5.

Дальнейшие исследования будут направлены на количественную оценку влияния способов формирования слоя на газодинамику столба материалов.

7. Семенов Ю. С. Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с нестабильным качеством шихтовых материалов // Бюллетень «Черная металлургия». 2013. № 12. С. 14–19.
8. Управление распределением шихтовых материалов в доменной печи при вдувании ПУТ с использованием информации термозондов / Ю. С. Семенов [и др.] // Сталь. 2017. № 6. С. 7–11.
9. Освоение энергосберегающей технологии загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях / В. И. Большаков [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. ИЧМ. 2014. Вып. 28. С. 57–80.
10. Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of Modern Blast Furnace / Bolshakov V. I. [et al.] // Metallurgical and Mining Industry. 2012. Vol. 4. № 3. P. 158–165.
11. Модельная система выбора и корректировки программ загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ / Ю. С. Семенов [и др.] // Металлург. 2012. № 9. С. 36–40.
12. Товаровский И. Г., Лялюк В. П. Эволюция доменной плавки. Днепропетровск : Пороги, 2001. 424 с.
13. Гиммельфарб А. А., Котов К. И. Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах. М. : Металлургия, 1982. 328 с.
14. Товаровский И. Г., Гладков Н. А., Нестеров А. С. Особенности формирования расплава в условиях малококсовой доменной плавки // Сталь. 1994. № 2. С. 7–12.
15. Шатоха В. И. Плавление, шлакообразование и формирование состава чугуна в доменном процессе. Днепропетровск : Пороги, 1997. 111 с.
16. Никитин Г. М., Беляков В. Н., Данаев Н. Т. Определение параметров вязкопластичной зоны в доменной печи // Сталь. 1992. № 4. С. 11–16.
17. Русаков П. Г., Русанов И. Ф. Обобщенные характеристики ситового состава неоднородного сыпучего материала // Заводская лаборатория. 1990. № 2. С. 68–69.
18. ГОСТ Р 50779.27-2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. М. : Стандартинформ, 2020. 62 с.
19. Аэров М. З., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы. Л. : Химия, 1979. 176 с.
20. Русанов И. Ф., Русанова Н. И. Влияние гранулометрического состава полифракционного сыпучего материала на газодинамическое сопротивление слоя // Сб. науч. тр. ДонГТУ. Алчевск : ДонГТУ, 2016. Вып. 47. С. 69–73.
21. Логинов В. И., Соломатин С. М., Корж А. Т. Опытные плавки при загрузке доменных печей смесью кокса и агломерата // Металлург. 1976. № 4. С. 14–18.
22. Загрузка железорудных материалов в смеси с коксом / В. И. Логинов [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1984. № 3. С. 10–12.
23. Работа доменной печи при совместной загрузке железорудных материалов и кокса в скип / В. И. Логинов [и др.] // Сталь. 1987. № 12. С. 7–12.

© Русанов И. Ф., Куберский С. В., Кононенко Г. И., Зелинская Н. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Должиковым В. В.,  
начальником патентного отдела ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 24.10.2024.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Русанов Игорь Фаустович**, канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Россия

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

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

**Кононенко Геннадий Иосифович**, аспирант каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Россия

**Зелинская Надежда Александровна**, студент каф. металлургических технологий

Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Россия

**Rusanov I. F., \*Kuberskiy S. V., Kononenko G. I., Zelinskaya N. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, \*e-mail: Skuberskiy@yandex.ru)

### **GAS-DYNAMIC RESISTANCE OF CHARGE MATERIALS LAYER AT VARIOUS METHODS OF ITS FORMATION**

*The results of laboratory studies on influence of the methods used to form blast furnace charge columns on their gas-dynamic resistance are presented. Variants of sinter loading, different fractional makeup, in layers, sinter and coke in layers with their premixing are considered. It is noted that gas-dynamic conditions change at the boundary of material layers differ in coarseness and homogeneity, which leads to a decrease or increase of gas-dynamic resistance of the materials column depending on value of the generalized characteristics of the fractional makeup materials.*

**Key words:** sinter, fractional makeup, coke, gas-dynamic resistance, layer, layered charge, premixing, ore burden.

#### **References**

1. Bolshakov V. I. *Theory and practice of blast furnace loading [Teoriya i praktika zagruzki domennyh pechej]*. M. : Metallurgiya, 1990. 256 p. (rus)
2. Russkikh V. P., Alengos M. A., Stepanov D. K. *Investigation of the influence of charge material loading systems on gas flow distribution in a blast furnace [Issledovanie vliyaniya sistem zagruzki shihtovykh materialov na raspredelenie gazovogo potoka v domennoj pechi]*. Vestnik of Volga State University of Technology. 2009. Iss. 19. Pp. 21–24. (rus)
3. Lyalyuk V. P. and [et al.]. *Influence of iron ore feed mass on technical and economic indicators of blast furnace smelting [Vliyanie massy zhelezorudnoj podachi na tekhniko-ekonomicheskie pokazateli domennoj plavki]*. Byulleten' «Chernaya metallurgiya». 2010. No. 11. Pp. 29–34. (rus)
4. Bolshakov V. I. [et al.]. *Implementation of energy-saving technology of modern blast furnace in the conjunctural and technological conditions of fuel and raw materials [Realizaciya energosberegayushchej tekhnologii zagruzki sovremennoj domennoj pechi v kon'yunkturyh toplivno-syr'evykh i tekhnologicheskikh usloviyah]*. Metallurgical and Mining Industry. 2014. No. 6. Pp. 6–14. (rus)
5. Kovshov V. N., Petrenko V. A. *Experimental studies of charge and gas movement in a blast furnace [Eksperimental'nye issledovaniya dvizheniya shihty i gaza v domennoj pechi]*. Dnepropetrovsk : Institut tekhnologii, 1996. 124 p. (rus)
6. Semenov Yu. S. [et al.]. *Model system for selection and correction of blast furnace loading programs equipped with bell-less top [Model'naya sistema vybora i korrrektirovki programm zagruzki domennoj pechi, oborudovannoj BZU]*. Metallurg. 2012. No. 9. Pp. 36–40. (rus)
7. Semenov Yu. S. *Selection of rational loading modes of a blast furnace equipped with bell-less top for conditions of operation with low feed mass and unstable quality of charge materials [Vybor racional'nykh rezhimov zagruzki domennoj pechi, oborudovannoj BZU, dlya uslovij raboty s maloj massoj podachi i s nestabil'nym kachestvom shihtovykh materialov]*. Byulleten' «Chernaya metallurgiya». 2013. No. 12. Pp. 14–19. (rus)

8. Semenov Yu. S. [et al.]. Control of charge material distribution in the blast furnace during PCI injection using thermoprobe information [Upravlenie raspredeleniem shihtovykh materialov v domennoj pechi pri vduvanii PUT s ispol'zovaniem informacii termozondov]. *Stal'*. 2017. No. 6. Pp. 7–11. (rus)

9. Bolshakov V. I. [et al.]. Development of energy-saving technology of blast furnace loading equipped with bell-less top in conjunctural fuel, raw materials and technological conditions [Osvoenie energosberegayushchej tekhnologii zagruzki domennoj pechi, oborudovannoj BZU, v kon'yunkturykh toplivno-syr'evykh i tekhnologicheskikh usloviyah]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii : sb. nauch. tr. IChM NANU*. 2014. Iss. 28. Pp. 57–80. (rus)

10. Bolshakov V. I. [et al.]. Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of Modern Blast Furnace. *Metallurgical and Mining Industry*. 2012. Vol. 4. No. 3. Pp. 158–165.

11. Semenov Y. S. [et al.]. Model system for selection and correction of blast furnace loading programs equipped with bell-less top [Model'naya sistema vybora i korrrektirovki programm zagruzki domennoj pechi, oborudovannoj BZU]. *Metallurg*. 2012. No. 9. Pp. 36–40. (rus)

12. Tovarovsky I. G., Lyalyuk V. P. Evolution of blast furnace smelting [Evolyuciya domennoj plavki]. *Dnepropetrovsk : Porogi*, 2001. 424 p. (rus)

13. Gimmel'farb A. A., Kotov K. I. Processes of reduction and slag formation in blast furnaces [Processy vosstanovleniya i shlakoobrazovaniya v domennykh pechakh]. *M. : Metallurgiya*, 1982. 328 p. (rus)

14. Tovarovsky I. G., Gladkov H. A., Nesterov A. S. Features of melt formation under conditions of low-coke blast furnace melting [Osobennosti formirovaniya rasplava v usloviyah malokoksovoj domennoj plavki]. *Stal'*. 1994. No. 2. Pp. 7–12. (rus)

15. Shatokha V. I. Melting, slag formation and formation of pig iron composition in the blast furnace process [Plavlenie, shlakoobrazovanie i formirovanie sostava chuguna v domennom processe]. *Dnepropetrovsk : Porogi*, 1997. 111 p. (rus)

16. Nikitin G. M., Belyakov V. N., Danaev N. T. Determination of parameters of viscoplastic zone in blast furnace [Opredelenie parametrov vyazkoplastichnoj zony v domennoj pechi]. *Stal'*. 1992. No. 4. Pp. 11–16. (rus)

17. Rusakov P. G., Rusanov I. F. Generalized characteristics of the sieve composition of heterogeneous bulk material [Obobshchennye harakteristiki sitovogo sostava neodnorodnogo sypuchego materiala]. *Industrial Laboratory*. 1990. No. 2. Pp. 68–69. (rus)

18. GOST R 50779.27-2017. Statistical methods. Veybulla distribution. Data analysis. *M. : Standartinform*, 2020. 62 p.

19. Aerov M. Z., Todes O. M., Narinsky D. A. Apparatuses with stationary granular bed: hydraulic and thermal fundamentals of operation [Apparaty so stacionarnym zernistym sloem: gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty]. *L. : Himiya*, 1979. 176 p. (rus)

20. Rusanov I. F., Rusanova N. I. Influence of granulometric composition of polyfractional bulk material on gas-dynamic resistance of the layer [Vliyanie granulometricheskogo sostava polifrakcionnogo sypuchego materiala na gazodinamicheskoe soprotivlenie sloya]. *Collection of Scientific Papers of DonSTU*. 2016. Iss. 47. Pp. 69–73. (rus)

21. Loginov V. I., Solomatin S. M., Korzh A. T. Experimental casts when loading the furnace with mixture of coke and agglomerate [Opytnye plavki pri zagruzke domennykh pechej smes'yu koksa i aglomerata]. *Metallurg*. 1976. No. 4. Pp. 14–18. (rus)

22. Loginov V. I. [et al.] Loading of ferrous materials in mixture with coke [Zagruzka zhelezorudnykh materialov v smesi s koksom]. *Metallurgical and Mining Industry*. 1984. No. 3. Pp. 10–12. (rus)

23. Loginov V. I. [et al.] Blast furnace operation at joint loading of iron ore materials and coke into the skip [Rabota domennoj pechi pri sovmestnoj zagruzke zhelezorudnykh materialov i koksa v skip]. *Stal'*. 1987. No. 12. Pp. 7–12. (rus)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Rusanov Igor Faustovich**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbass State Technical University  
Alchevsk, Russia

***Kuberskiy Sergey Vladimirovich***, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies

*Donbass State Technical University*

*Alchevsk, Russia,*

*e-mail: Skuberskiy@yandex.ru*

***Kononenko Gennady Iosifovich***, Postgraduate, Department of Metallurgical Technologies

*Donbass State Technical University*

*Alchevsk, Russia*

***Zelinskaya Nadezhda Aleksandrovna***, Student of the Department of Metallurgical Technologies

*Donbass State Technical University*

*Alchevsk, Russia*