

4. Ефименко Г.Г. Металлургия чугуна / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. – Киев : Вища школа, 1981. – 496 с.
5. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман [и др.]. – М. : Академкнига, 2004. – 774 с.

Bibliography:

1. Mechanism of mineralization and metallurgical properties of the agglomerates basicity 1.1 – 3.1 under ММК / Т. Malysheva [etc.] // Steel. – 2007. – №2. – P. 19-22. (Rus.)
2. Properties of sinter with a basicity of 0.6–3.4/ N.V. Fedorenko [etc.] // Metallurgist. – 1970. – №9. – P. 3-5. (Rus.)
3. Utkov V. Highly basic sinter / V. Utkov. – М. : Metallurgia, 1977. – 156 p. (Rus.)
4. Efimenko G. Ironmaking / G. Efimenko, A. Gimmelfarb, V. Levchenko. – Kiev : Visha shkola, 1981. – 496 p. (Rus.)
5. Ironmaking / E. Vegman [etc.]. – М. : Akademkniga, 2004. – 774 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 09.04.2014

УДК 669.162.263.23.004.67

© Липунов С.А.*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ
ЗОНЫ КОГЕЗИИ**

В статье рассмотрены теоретические основы газодинамики доменного процесса. В работе проведено экспериментальное исследование газопроницаемости зоны когезии.

Ключевые слова: зона когезии, доменная печь, газодинамика, физическая модель, давление, скорость движения газа.

Липунов С.О. Экспериментальне дослідження газопроникності зони когезії. У статті розглянути теоретичні основи газодинаміки доменного процесу. В роботі проведено експериментальне дослідження газопроникності зони когезії.

Ключові слова: зона когезії, доменна піч, газодинаміка, фізична модель, тиск, швидкість руху газу.

S.O. Lipunov. Experimental research of gas permeability within cohesion area. In the article research theory of gas dynamics in blast furnace. The work presents an experimental research of gas permeability within the cohesion area.

Keywords: area of cohesion, blast furnace, gas dynamics, physical model, pressure, gas velocity.

Постановка проблемы. Газопроницаемость столба шихтовых материалов в доменной печи является фактором лимитирующим производительность печей. Столб шихтовых материалов не однороден. Он состоит из «сухой» части, «мокрой» и зоны когезии. Наибольшее сопротивление прохождению газов оказывает зона когезии. Зона когезии это область в доменной печи в которой материалы из твердого состояния переходят в пластичное. Так как доменная печь это агрегат непрерывного действия изучение процессов протекающих в ней затруднено. Изучение газодинамики возможно при помощи экспериментальных установок.

Анализ последних исследований и публикаций. Научно-практические исследования

* аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь,
lipunov-sergei@mail.ru

газопроницаемости шихты и зоны когезии в доменной печи отображены во многих научных работах отечественных и зарубежных ученых. Особое место в изучении газодинамики доменного процесса занимают такие ученые как, Тарасов В.П., Томаш А.А, Dong X.F., Yu A.B., Pinson D., Zulli P., Zhang S.J.

Цель статьи – оценить влияние конфигурации зоны когезии на ее газопроницаемость.

Изложение основного материала. Зона когезии образуется в результате размягчения железорудной составляющей доменной шихты под воздействием высоких температур. Данная зона оказывает лимитирующее влияние на производительность ДП в силу ее низкой газопроницаемости. Величина влияния ЗК на газодинамику доменной плавки зависит от конфигурации пластичной зоны. Для формирования рационального газораспределения в доменной печи с точки зрения газодинамики и экономичности работы печи важно знать величину влияния параметров ЗК на характер движения газов в печи. Поэтому задачей исследования является определение влияния параметров ЗК на перепад давления в печи [1-3].

Для проведения исследования была сконструирована модель доменной печи полезным объемом 2002 м³ в масштабе 1:15.

В доменной печи газы имеют турбулентный режим движения, т.е. число Рейнольдса (Re) достигает 10000, а скорость движения газа в межкусковом пространстве достигает 10 м/с. Число Рейнольдса определяют по уравнению (1) [4].

$$Re = \frac{V \cdot d_n}{\nu}, \quad (1)$$

где V – скорость движения газа в межкусовых пустотах, м/с; d_n – диаметр межкусовых пустот, м; ν – кинематическая вязкость газа, м²/с.

В лабораторных условиях не представляется возможным получить число Рейнольдса равное числу Рейнольдса на реальной печи, так как при такой скорости движения газа в слое зернистых материалов произойдет псевдо ожигание слоя и выбрасывание его из лабораторной установки. В этом случае необходимо применить принцип автомодельности. В соответствии с принципом автомодельности на модели и реальном объекте необходимо соблюдать равенство не всех критериев подобия, а только определяющих критериев [5]. Определяющим является критерий подобия, содержащий исследуемую функцию. В данном случае определяющим является критерий Эйлера (Eu) уравнение (2), который содержит исследуемую функцию ΔP.

$$Eu = \Delta P / \rho U^2, \quad (2)$$

где U – скорость движения газа в межкусовых пустотах, м/с; ρ – плотность газа, кг/м³; ΔP – перепад давления, Па.

На модели необходимо подобрать такие условия, при которых определяющий критерий остаётся практически неизменным при изменении других критериев, сохраняя примерное равенство определяющему критерию на реальном объекте. В ходе постановочных опытов в газодинамическую модель поочередно загружали частицы шихты различной крупности d (таблица 1). Каждую порцию шихты продували воздухом плотностью 1,29 кг/м³ с постоянной приведенной к пустому сечению скоростью U₀ = 0,05 м/с, измеряя перепад давления воздуха ΔP. Кинематическая вязкость воздуха равна 1,34·10⁻⁵ м²/с. После продувки модель освобождали от шихты и загружали материал с большей крупностью частиц. Определённый экспериментально перепад давления воздуха в модели, загруженной шихтой с различной крупностью частиц, приведен в таблице 1.

Графическая зависимость определяющего критерия Eu от критерия Re представлена на рис. 1.

При значениях Re ≥ 25 (рис. 1 т. А) значение определяющего критерия Eu меняется незначительно. Область графической зависимости, в которой значение определяющего критерия меняется незначительно, оставаясь примерно равным значению на реальном объекте, называется областью автомодельности.

На всём протяжении области автомодельности, независимо от значения неопределяющего критерия подобия Re, автоматически выполняется условие:

$$Eu_M \approx Eu_0, \quad (3)$$

где Eu_M – значение критерия Эйлера на модели; Eu_0 – значение критерия Эйлера на реальном объекте.

Таблица 1

Результаты постановочных экспериментов

Крупность частиц d, мм	Средний диаметр d_{CP} , мм	Перепад давления ΔP , Па	$Re = U_0 \cdot d_{CP} / \nu$	$Eu = \Delta P / \rho U_0^2$
1	2	3	4	5
1 – 3	2,0	2400	9	29767
3 – 5	4,0	800	17	9922
5 – 10	7,5	600	33	7442
10 - 25	17,5	450	76	5581

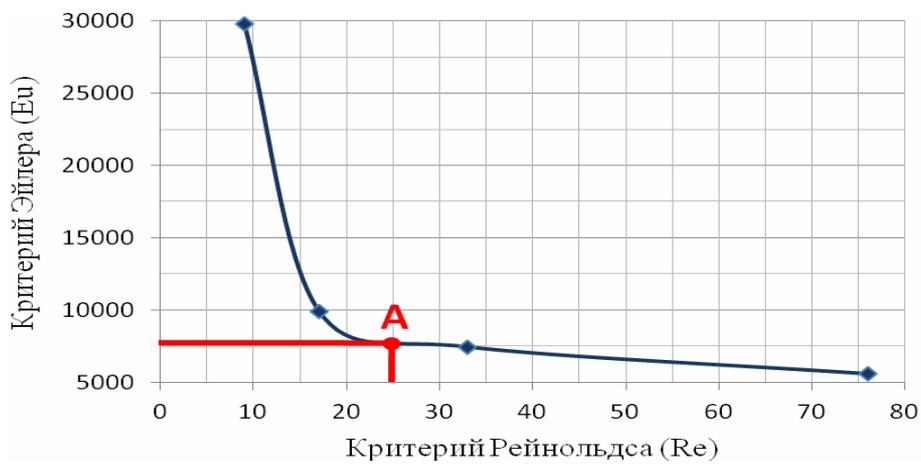


Рис. 1 – Зависимость определяющего критерия Eu от критерия Re

Таким образом, для выполнения условий теории подобия можно выбирать любую крупность частиц, при которой значение Re не выйдет за пределы области автомодельности. Минимальная крупность частиц соответствует граничному значению $Re = 25$ (т. А рис. 1).

$$d_{MIN} = Re \cdot \nu / U_0 = 25 \cdot 1,34 \cdot 10^{-5} / 0,05 = 0,007 \text{ м} = 7 \text{ мм}, \quad (4)$$

где d_{MIN} – диаметр части при котором выполняется принцип автомодельности, м; Re – критерий Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; U_0 – скорость движения газов, $\text{м}/\text{с}$.

Для исследования газопроницаемости зоны когезии на модели выбираем крупность шихты равную 10мм. Имитацию зоны когезии проводили за счет закладки в слой сыпучего материала пенопласта рис. 2.

За исследуемую функцию был принят перепад давления газа. Аргументами в этом случае были приняты: $H_{пер, пр.з., ц.з.}$ высота корня зоны когезии в периферийной, промежуточной, центральной зонах соответственно; $l_{к.о.}$ высота коксовых окон; $h_{з.к.}$ толщина зоны когезии:

$$\Delta P = f (H_{пер, пр.з., ц.з.}, l_{к.о.}, h_{з.к.}). \quad (5)$$

Для проведения экспериментов был выбран план Хартли (Ha_5) для пяти факторов [5]. Параметры плана Хартли представлены в таблице 2. При проведении опытов изменяли конфигурацию зоны когезии, меняя ее положение по высоте, изменяли толщину зоны когезии, высоту коксовых окон.

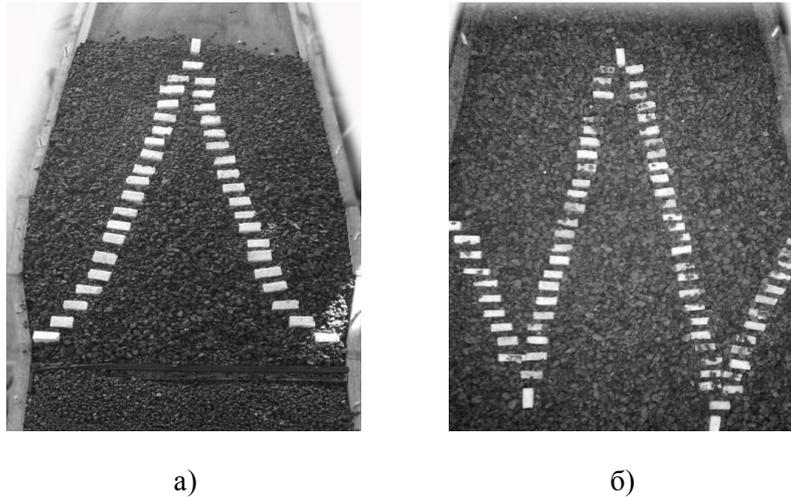


Рис. 2 – Имитация зоны когезии: а) – имитация Λ образной формы зоны когезии; б) – имитация W образной формы зоны когезии

Таблица 2

Параметры плана Хартли			
Число факторов (n)	Значение плеча (α)	Число опытов в центре плана (n_0)	Общее число опытов (N)
1	2	3	4
5	1,000	1	27

Уравнение, получаемое при выполнении данного плана должно иметь следующий вид:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^N b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^N b_{ii} \cdot X_{ii}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{p=i+1}^N b_{ip} \cdot X_i \cdot X_p, \quad (6)$$

где b – коэффициенты при параметрах X ; Y – искомая функция; N – количество переменных.

В таблице 3 представлено кодирование факторов.

Таблица 3

Характеристика плана	Натуральный масштаб					Нормированный масштаб
	$H_{пер}$ М	$H_{пр.з}$ М	$H_{ц.з}$ М	$l_{к.о}$ М	$h_{з.к.}$ М	
1	2	3	4	5	6	7
Нулевой уровень	5	5	5	1	0,4	0
Верхний уровень	10	10	10	1,5	0,5	1
Нижний уровень	0	0	0	0,5	0,3	-1

В результате проведения экспериментов по плану Хартли расчетов коэффициентов уравнения зависимости $\Delta P = f(H_{пер}, H_{пр.з}, H_{ц.з}, l_{к.о}, h_{з.к.})$ получено уравнение (7).

$$\begin{aligned} \Delta P = & 137,7 - 5,03 \cdot H_{пер} - 4,75 \cdot H_{пр.з} - 4,75 \cdot H_{ц.з} - 3,58 \cdot l_{к.о} + 13,97 \cdot h_{з.к.} \\ & + 17,84 \cdot H_{пер} \cdot H_{пр.з} + 11,59 \cdot H_{пер} \cdot H_{ц.з} - 4,72 \cdot H_{пер} \cdot l_{к.о} + 1,91 \cdot H_{пер} \cdot h_{з.к.} + \\ & + 16,28 \cdot H_{пр.з} \cdot H_{ц.з} - 3,16 \cdot H_{пр.з} \cdot l_{к.о} + 0,97 \cdot H_{пр.з} \cdot h_{з.к.} - \\ & - 5,66 \cdot H_{ц.з} \cdot l_{к.о} + 2,22 \cdot H_{ц.з} \cdot h_{з.к.} - 5,34 \cdot l_{к.о} \cdot h_{з.к.} - \\ & - 17,92 \cdot H_{пер}^2 - 22,92 \cdot H_{пр.з}^2 - 12,92 \cdot H_{ц.з}^2 + 7,08 \cdot l_{к.о}^2 + 11,08 \cdot h_{з.к.}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

В таблиці 4 приведен анализ значимости коэффициентов уравнения регрессии при помощи критерия Стьюдента.

Таблица 4

Анализ значимости коэффициентов уравнения зависимости
 $\Delta P = f(H_{пер}, H_{пр.з}, H_{ц.з}, l_{к.о}, h_{з.к.})$

Фактор	b	t _p	t _к	Знач./Не знач.
1	2	3	4	5
$H_{пер}$	-5,03	2,14	2	Знач.
$H_{пр.з}$	-4,75	2,03	2	Знач.
$H_{ц.з}$	-4,75	2,03	2	Знач.
$l_{к.о}$	-3,58	1,53	2	Не знач.
$h_{з.к.}$	13,97	5,96	2	Знач.
$H_{пер} H_{пр.з}$	17,84	7,18	2	Знач.
$H_{пер} H_{ц.з}$	11,59	4,66	2	Знач.
$H_{пер} l_{к.о}$	-4,72	1,90	2	Не знач.
$H_{пер} h_{з.к.}$	1,91	0,77	2	Не знач.
$H_{пр.з} H_{ц.з}$	16,28	6,55	2	Знач.
$H_{пр.з} l_{к.о}$	-3,16	1,27	2	Не знач.
$H_{пр.з} h_{з.к.}$	0,97	0,39	2	Не знач.
$H_{ц.з} l_{к.о}$	-5,66	2,27	2	Знач.
$H_{ц.з} h_{з.к.}$	2,22	0,89	2	Не знач.
$l_{к.о} h_{з.к.}$	-5,34	2,15	2	Знач.
$H_{пер}^2$	-17,92	2,83	2	Знач.
$H_{пр.з}^2$	-22,92	3,62	2	Знач.
$H_{ц.з}^2$	-12,92	2,04	2	Знач.
$l_{к.о}^2$	7,08	1,12	2	Не знач.
$h_{з.к.}^2$	11,08	1,75	2	Не знач.

После анализа значимости коэффициентов в уравнении (7) из него были исключены не значимые коэффициенты и уравнение приобрело следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta P = & 137,7 - 5,03 \cdot H_{пер} - 4,75 \cdot H_{пр.з} - 4,75 \cdot H_{ц.з} + 13,97 \cdot h_{з.к.} \\ & + 17,84 \cdot H_{пер} \cdot H_{пр.з} + 11,59 \cdot H_{пер} \cdot H_{ц.з} + \\ & + 16,28 \cdot H_{пр.з} \cdot H_{ц.з} - \\ & - 5,66 \cdot H_{ц.з} \cdot l_{к.о} + 2,22 \cdot H_{ц.з} \cdot h_{з.к.} - 5,34 \cdot l_{к.о} \cdot h_{з.к.} - \\ & - 17,92 \cdot H_{пер}^2 - 22,92 \cdot H_{пр.з}^2 - 12,92 \cdot H_{ц.з}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Коэффициент корреляции данных полученных путем расчета по уравнению (8) и экспериментальных данных равен 0,88. В раскодированном виде уравнение (8) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta P = & 43,14 + 0,276 \cdot H_{пер} + 1,39 \cdot H_{пр.з} - 0,868 \cdot H_{ц.з} + 54,04 \cdot l_{к.о} \\ & + 224,3 \cdot h_{з.к.} + 0,714 \cdot H_{пер} \cdot H_{пр.з} + 0,464 \cdot H_{пер} \cdot H_{ц.з} + \\ & + 0,6512 \cdot H_{пр.з} \cdot H_{ц.з} - \\ & - 2,26 \cdot H_{ц.з} \cdot l_{к.о} + 4,44 \cdot H_{ц.з} \cdot h_{з.к.} - 106,8 \cdot l_{к.о} \cdot h_{з.к.} - \\ & - 0,717 \cdot H_{пер}^2 - 0,917 \cdot H_{пр.з}^2 - 0,517 \cdot H_{ц.з}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Адекватность полученной модели была проверена при помощи критерия Фишера. Также был определен расчет оптимума для данной функции. Оптимум выполняется тогда, когда высота корня зоны когезии на периферии максимальна, в промежуточной зоне минимальна, в центральной зоне максимальна, а толщина зоны когезии минимальна.

Выводы

1. Получено уравнение описывающее зависимость газопроницаемости зоны когезии от ее конфигурации.
2. Толщина зоны когезии оказывает наибольшее влияние на газопроницаемость данной зоны, с увеличением ее толщины газопроницаемость снижается.
3. Наиболее влиятельным взаимодействием факторов оказалось взаимодействие высоты корня зоны когезии в периферийной зоне и промежуточной.
4. Перепад давления газа равен минимальному значению тогда, когда высота корня зоны когезии на периферии максимальна, в промежуточной зоне минимальна, в центральной зоне максимальна, толщина зоны когезии минимальна.
5. С увеличением высоты коксовых окон перепад давления снижается не значительно, это справедливо для случая когда суммарная площадь окон для прохода газов не изменяется.
6. В ходе данной работы определено влияние конфигурации зоны когезии на газодинамический режим работы печи, что в свою очередь дает возможность прогнозировать интенсивность работы печи по дутью.

Список использованных источников:

1. Тарасов В.П. Теория и технология доменного процесса / В.П. Тарасов, П.В. Тарасов. – М. : Интермет Инжиниринг, 2007. – 384 с.
2. Товаровский И.Г. Эволюция доменного процесса / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк. – Днепропетровск : Пороги, 2000. – 424 с.
3. Фазовые превращения материалов при доменной плавке / И.Д. Балон, И.В. Буклан, В.Н. Муравьев, Ю.Ф. Никулин. – М. : Metallurgiya, 1984. – 152 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.
5. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента / В.Н. Ковшов. – Киев: Вища школа, 1982. – 120 с.

Bibliography:

1. V.P. Tarasov Theory and technology of blast furnace / V.P. Tarasov, P.V. Tarasov. – M. : Internet Engineering, 2007. – 384 p. (Rus.)
2. I.G. Tovarovskiy The evolution of the blast furnace process / I.G. Tovarovskiy, V.P. Lyaluk. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2000. – 424 p. (Rus.)
3. Phase transformations in material in blast furnace / I.D. Balon, I.V. Buklan, V.N. Muravyov, Y.F. Nikulin. – M. : Metallurgiya, 1984. – 152 p. (Rus.)
4. L.G. Loytsyansky Mechanics of liquid and gas / L.G. Loytsyansky. – M. : Drofa, 2003. – 840 p. (Rus.)
5. V.N. Kovshov. Statement of engineering experiment / V.N. Kovshov. – Kiev : Visha shkola, 1982. – 120 p. (Rus.)

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛПТУ»

Статья поступила 22.04.2014