

**МЕТАЛУРГІЯ ЧАВУНУ**

УДК 669.162.261.3

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181267

© Семакова В.Б.\*

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПО РАДИУСУ КОЛОШНИКА  
ПРИ ЗАГРУЗКЕ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ РАЗДЕЛЬНЫХ КОКСОВЫХ  
И РУДНЫХ ПОДАЧ**

*Проанализировано изменение радиальных рудных нагрузок при загрузке доменной печи раздельными увеличенными рудными и коксовыми подачами. Исследовано изменение соотношения высот рудных и коксовых слоев по радиусу печи при повышении рудной нагрузки в цикле подач. Проведено сравнение радиального распределения слоев агломерата и окатышей при изменении угла наклона засыпи.*

**Ключевые слова:** агломерат, окатыши, кокс, доменная печь, раздельная загрузка, рудная нагрузка, угол наклона поверхности.

**Семакова В.Б. Розподіл матеріалів по радіусу колошника при завантаженні в доменну піч роздільних коксових і рудних подач.** Мета статті – аналітично дослідити розподіл шарів рудних матеріалів і коксу по радіусу доменної печі після завантаження конусним завантажувальним пристроєм роздільними чотирискіповими подачами при підвищенні рудного навантаження на кокс з 3,5 до 5,0 кг/кг. Проаналізовано зміну радіальних рудних навантажень при завантаженні доменної печі роздільними збільшеними рудними і коксовими подачами за допомогою конусного завантажувального пристрою. При завантаженні циклу подач 4Р↓ 4К↓ з розташуванням гребеня матеріалів у стін печі на положу поверхню засипу характер розподілу рудних навантажень по радіусу колошника залежить від співвідношення кутів природного укусу та об'ємів рудних матеріалів і коксу. Проаналізовано зміну співвідношення висот рудних і коксових шарів по радіусу печі при підвищенні загального рудного навантаження в циклі подач. Порівняння розподілу шарів рудних матеріалів по радіусу колошника показало, що при завантаженні агломерату зменшення загального рудного навантаження забезпечує формування у вісі печі газопроникної зони, заповненої коксом, що сприяє створенню осьового газового потоку. При підвищених рудних навантаженнях у циклі подач осьовий стовп шихти представлено сумішшю агломерату і коксу, що знижує його газопроникність. Робота доменної печі з використанням окатишів, які мають менший кут природного укусу порівняно з агломератом, характеризується створенням у центрі колошника зони зі зниженою газопроникністю, яка заповнена рудним матеріалом, і розвитком периферійного газового потоку. Підвищення рудного навантаження більш 4,5 кг/кг у циклі з двох роздільних збільшених подач коксу та рудних матеріалів і частки окатишів у шихті потребує вдосконалення режимів завантаження доменних печей.

**Ключові слова:** агломерат, окатиші, кокс, доменна піч, роздільне завантаження, рудне навантаження, кут нахилу поверхні.

**V.B. Semakova. Materials distribution along the top radius at charging the blast furnace with separate coke and ore supplies.** The objective of the article is to investigate analytically the distribution of the layers of ore materials and coke along the blast furnace radius after the charging with a bell-type charging unit by means of separate four-

\* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [semakova-v@ukr.net](mailto:semakova-v@ukr.net)

*skip supplies with an increase of ore to coke ratio loading from 3,5 to 5,0 kg/kg. Alternations in radial ore loads at blast furnace charging with increased separate ore and coke supplies by means of a charging unit of a bell-type have been analyzed. It was shown that at the charging with the cycle of supplies of 4P↓ 4K↓ types with formation of the crest of the materials near the furnace walls upon the flat surface of the bulk the distribution of ore loads along the furnace top radius depended upon the relations of natural inclination angles and the volumes of coke and ore materials. The change in relationship between the heights of ore and coke layers along the furnace radius at increased aggregate ore load within the charging cycle has been analyzed. The comparison of ore materials layers distribution along the top radius showed that a decrease in aggregate ore load at the charging with sintered ore ensured formation of an increased gas permeability area inside the centre of the furnace, which is filled with coke and thus promotes formation of axial gas flow. At increased ore loads in the supplies cycle the axial column of the charge comprises a mixture of sintered ore and coke with decreased gas permeability. Blast furnace operation with application of pellets that have smaller angle of natural inclination, as compared to sintered ore is characterized by formation of a decreased gas permeability area inside the centre of the top, which is filled with ore material and has a peripheral gas flow. An increase in ore load, exceeding the value of 4,5 kg/kg in the cycle, consisting of two separate enlarged supplies of coke, ore materials and pellets supplies in the charge requires modified modes of blast furnaces charging.*

**Keywords:** *sintered iron ore, pellets, coke, blast furnace, separate charging, ore load, inclination angle of the surface.*

**Постановка проблеми.** В связи со стремлением доменщиков заменить дорогостоящий кокс более дешевыми видами топлива, в т. ч. внедрением на доменных печах (ДП) технологии вдувания измелённых углей, объёмная доля кокса в столбе шихтовых материалов уменьшается примерно на 30%, и, как следствие, снижается газопроницаемость всей шихты, рудная нагрузка (РН) на кокс повышается и составляет более 4,5 кг/кг [1, 2]. При этом объёмное соотношение рудных материалов и кокса резко изменяется, что приводит к перераспределению материалов и газов по сечению колошника, которое определяет производительность работы доменной печи и расход кокса на выплавку 1 т чугуна. Следовательно, загрузка доменных печей в изменившихся условиях, когда объём рудных материалов превышает объём кокса, требует дополнительных исследований радиального распределения рудных нагрузок (РН) на кокс для совершенствования систем загрузки шихты с целью сохранения высокопроизводительной и экономичной выплавки чугуна.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Распределение материалов и газов по сечению колошника определяется технологией загрузки шихты при помощи конусных и бесконусных загрузочных устройств (БЗУ). БЗУ обеспечивают гибкое регулирование радиального распределения шихты на колошнике. Возможности управления распределением материалов по радиусу печи при помощи конусных загрузочных устройств (КЗУ) более ограничены.

Для перераспределения шихтовых материалов по сечению печи при их загрузке КЗУ изменяют следующие основные технологические параметры: порядок загрузки компонентов шихты на большой конус, массу подачи, уровень засыпи [3, 4]. Также воздействовать на распределение материалов по радиусу печи возможно применением ступенчатого хода конуса, изменением скорости его движения, загрузкой шихты в печь с ожиданием и без ожидания достижения заданного уровня засыпи («следом») и т. д.

В доменном цехе ЧАО «ММК им. Ильича» замена традиционного режима загрузки смешанными подачами на раздельную загрузку печей увеличенными подачами агломерата АААА↓ и кокса КККК↓ способствовала снижению расхода кокса в сопоставимых условиях на 26 кг/т чугуна с повышением производительности печи на 3,6% и более при повышении рудной нагрузки с 3,34 до 3,58 кг/кг кокса без снижения газопроницаемости столба шихты [5, 6]. Данная схема загрузки обеспечила более равномерное распределение шихтовых материалов по сечению печи при сохранении высоких слоев кокса («коксовых окон»), улучшающих газопроницаемость столба шихты в целом, в т. ч. в зоне размягчения. Кроме того, в высоких газопрони-

цаемых слоях кокса происходит некоторое выравнивание газового потока под рудными линзами, что также способствует повышению степени использования энергии газа. Для управления радиальным распределением материалов и газов применялись режимы загрузки шихты с переменным уровнем засыпи, с различной скоростью опускания большого конуса, с ожиданием и без ожидания достижения заданного уровня засыпи вследствие отсутствия возможности регулирования распределения материалов по радиусу колошника порядком скипов в подаче.

Загрузка доменных печей ЧАО «ММК им. Ильича» увеличенными отдельными порциями обеспечила эффективное внедрение технологии плавки с вдуванием ПУТ [2]. Замена части кокса ПУТ способствовала повышению рудной нагрузки на кокс свыше 4 кг/кг, что ухудшило газодинамические условия плавки не только вследствие уменьшения толщины слоя кокса в столбе шихты, но и качественного изменения распределения радиальных рудных нагрузок на кокс при работе доменной печи с постоянной схемой загрузки.

**Цель статьи** – аналитически исследовать распределение слоев рудных материалов и кокса по радиусу печи после загрузки КЗУ отдельными четырехскиповыми порциями при повышении РН, т. е. массового отношения рудной (Р) и коксовой (К) составляющих в цикле из двух подач  $PPPP \downarrow KKKK \downarrow$ , с 3,5 до 5,0 кг/кг кокса.

**Изложение основного материала.** Данное исследование проводилось при помощи математического моделирования расположения слоев кокса и рудных материалов при их загрузке КЗУ доменной печи полезным объемом  $2000 \text{ м}^3$  с радиусом колошника  $r = 3,65 \text{ м}$  при массе рудного скипа 14,5 т. Следует отметить, что распределение материалов по сечению печи также зависит от многих других факторов, например, угла наклона поверхности засыпи в печи, качества компонентов шихты, их вида (кокс, агломерат, окатыши), в т. ч. угла их естественного откоса  $\alpha_m$ . Для определения качественного изменения радиальных РН на кокс рассматривалось расположение рудных и коксовых слоев при загрузке материалов с уровнем засыпи, соответствующим их укладке непосредственно к стенам колошника, на пологую поверхность засыпи (рис. 1). В действующих доменных печах в зависимости от технологических параметров работы возможно образование как воронкообразной формы поверхности засыпи, так и куполообразной [7, 8]. Однако после загрузки в доменную печь материалы в течение малого периода времени растекаются по колошнику и образуют поверхность засыпи с углом наклона к горизонтальной поверхности  $\alpha_z = 5-12^\circ$  [9]. Математическое моделирование расположения слоев компонентов шихты на колошнике с пологой поверхностью засыпи  $\alpha_z = 0^\circ$  и при  $\alpha_z = 10^\circ$  перед загрузкой очередной подачи проводилось без учета перетока материалов к оси печи [10] для выявления качественного отличия характера распределения РН по радиусу колошника.

Качество шихтовых материалов изменяется в широких пределах. При моделировании для изучения поведения материалов с различными характеристиками были приняты следующие углы естественного откоса: для кокса  $\alpha_k = 27^\circ$ , агломерата  $\alpha_a = 32^\circ$ , окатышей  $\alpha_{ок} = 16^\circ$ . Масса четырехскиповой подачи рудных материалов оставалась неизменной и составляла 58 т. Масса коксовой подачи определялась рудной нагрузкой и при её повышении от 3,5 до 5,0 кг/кг сокращалась соответственно с 16,57 до 11,60 т. При этом объем коксовой подачи уменьшался с 36,83 до 25,78  $\text{м}^3$  с учетом принятой его насыпной плотности  $\rho_k = 0,45 \text{ т/м}^3$ .

На рисунке 1 (а) показано расположение слоев агломерата (прямая 1), насыпная плотность которого принята равной  $\rho_a = 1,70 \text{ т/м}^3$ , и кокса (2-5) при различной общей РН в цикле из двух подач  $4A \downarrow 4K \downarrow$ . Как видно из рис. 1 (а), радиус осевой зоны, не покрытой агломератом, составляет  $r_{oc} = 1,17 \text{ м}$  (граница показана линией 9), а радиус осевой зоны, не покрытой коксом (граница показана линией 10),  $r_{oc} = 0,71 \text{ м}$  при РН = 3,5 кг/кг; 0,94 м при РН = 4,0 кг/кг; 1,12 м при РН = 4,5 кг/кг; 1,28 м при РН = 5,0 кг/кг. Таким образом, при РН менее 4,5 кг/кг у оси печи создаются условия для образования газопроницаемой коксовой «отдушины». При РН = 4,5 кг/кг протяженности вдоль радиуса колошника слоев кокса и агломерата близки  $l_k \approx l_a$ , а при РН более 4,5 кг/кг –  $l_a > l_k$  вследствие малой массы кокса, и у оси печи концентрируется рудная часть, что снижает развитие осевого газового потока.

С точки зрения газопроницаемости доменной шихты недостаточно знать только РН в определенном объеме материалов, необходимо иметь представление о высотах слоев кокса и рудной части шихты, так как отсутствие четко выраженной коксовой прослойки приводит к повышению сопротивления всего слоя шихты проходу газов [11]. Согласно результатам иссле-

дований [11] було прийнято, що при висоті коксової прослойки менше 0,25 м происходит истончение слоев кокса и его перемешивание с рудными материалами, что ухудшает общую газопроницаемость шихты. В этих условиях ширина периферийного кольца колошника с ограниченными слоями кокса и агломерата составляет 2,45 м при  $RH = 3,5$  кг/кг; 2,22 м при  $RH = 4,0$  кг/кг; 2,03 м при  $RH = 4,5$  кг/кг; 1,88 м при  $RH = 5,0$  кг/кг, т. е. непрерывно уменьшается. Как показывает анализ рис. 1 (а), соотношение высот агломерата и кокса, а, следовательно, и  $RH$ , практически постоянно у стен печи и в промежуточной зоне (Пр3).

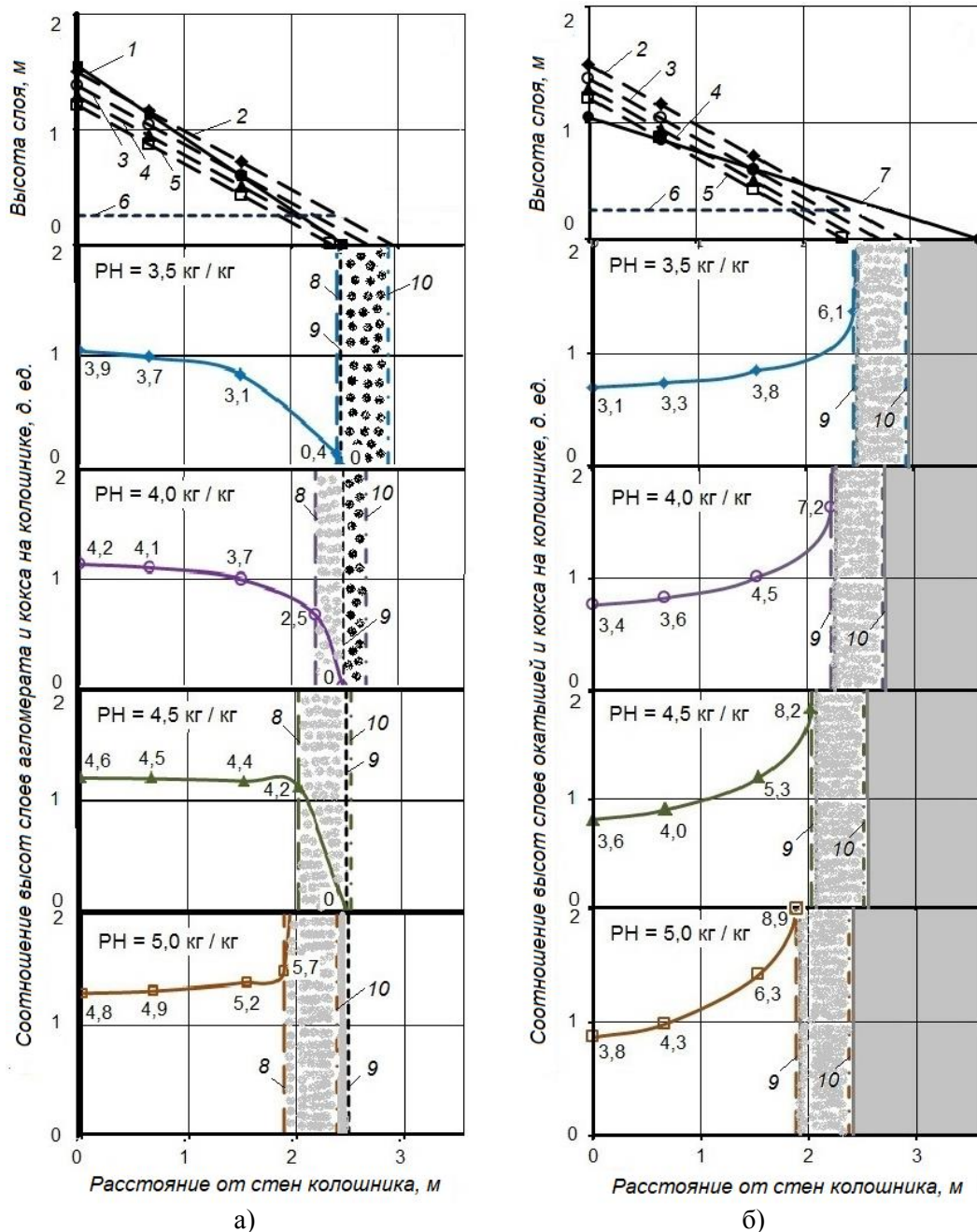


Рис. 1 – Расположение по радиусу колошника слоев: агломерата (1), кокса при общей  $RH$  в цикле подач  $4P \downarrow 4K \downarrow$ , кг/кг: 3,5 (2), 4,0 (3), 4,5 (4), 5,0 (5); кокса постоянной высоты  $h_k = 0,25$  м (6), окатышей (7); границ осевой зоны при  $h_k$  менее 0,25 м (8), не покрытой рудным материалом (9) и коксом (10): а – при загрузке подач  $4A \downarrow 4K \downarrow$ ; б – при загрузке подач  $4O \downarrow 4K \downarrow$ . Цифры у кривых – радиальные рудные загрузки, кг/кг

При РН = 3,5 кг/кг в цикле двух отдельных подач рудная нагрузка в периферийной зоне (ПЗ) составляет 3,7-3,9 кг/кг, в ПрЗ – 3,1-3,7 кг/кг, непрерывно снижаясь к центру печи, где образуется кольцо кокса с внешним радиусом  $r_{внш} = 1,17$  м шириной  $b = 0,45$  м.

При РН = 4,0 кг/кг в цикле двух подач рудная нагрузка на периферии составляет 4,1-4,2 кг/кг, в ПЗ – 3,7-4,1 кг/кг, также непрерывно снижаясь к центру печи, где образуется кольцо кокса с  $r_{внш} = 1,17$  м,  $b = 0,23$  м. Кроме того, между кольцом кокса и зоной с ограниченными слоями кокса и агломерата, расположенной у стен печи, образуется кольцо, заполненное смесью агломерата и кокса, с внутренним радиусом, соответственно,  $r_{внт} = 1,17$  м,  $b = 0,27$  м. Уменьшение площади центрального кольца кокса и образование примыкающего к нему кольца из смеси агломерата и кокса снижает газопроницаемость столба шихтовых материалов в целом.

Напряженные газодинамические условия доменной плавки возникают при достижении общей РН = 4,5 кг/кг, так как у оси печи коксовое кольцо сменяется кольцом из смеси компонентов с худшей газопроницаемостью ( $b = 0,5$  м,  $r_{внт} = 1,12$  м). Рудная нагрузка в ПЗ составляет 4,5-4,6 кг/кг, в ПрЗ – 4,4-4,5 кг/кг и 4,2 кг/кг на границе с зоной из смеси материалов, в которой резко снижается до 0 кг/кг. При достижении РН = 5,0 кг/кг радиальное распределение материалов качественно изменяется – радиальные РН повышаются к центру печи. РН у стен колошника составляет 4,9-4,8 кг/кг, в ПЗ – 5,2-4,9 кг/кг и 5,7 кг/кг на границе с зоной из смеси материалов ( $r_{внш} = 1,88$  м,  $b = 0,49$  м), в которой резко повышается к центру печи, где образуется кольцо агломерата с пониженной газопроницаемостью ( $r_{внш} = 1,28$  м,  $b = 0,11$  м), что ухудшает газопроницаемость у оси печи. Соотношение высот слоев агломерата и кокса на периферии при повышении рудной нагрузки в цикле из двух отдельных подач непрерывно растет с 1,04 д. ед. при РН = 3,5 кг/кг до 1,28 д. ед. при РН = 5,0 кг/кг.

На рисунке 1 (б) аналогично показано расположение слоев кокса (2-5) и окатышей (7) при различной РН в цикле из двух подач 4O↓ 4K↓. Окатыши, имеющие меньший угол естественного откоса не только в сравнении с агломератом, но и с коксом, распространяются по всей длине радиуса колошника. Таким образом, даже при относительно низкой РН = 3,5 кг/кг у оси печи формируется слой окатышей, не покрытых коксом, радиусом 0,71 м. С увеличением общей РН радиус осевой зоны, состоящей исключительно из окатышей, растет, соответственно, до 0,94 м (РН = 4,0 кг/кг), 1,12 м (РН = 4,5 кг/кг) и 1,28 м (РН = 5,0 кг/кг), а высота слоя кокса у стен колошника уменьшается с 1,50 м при РН = 3,5 кг/кг до 1,38 м (РН = 4,0 кг/кг), 1,29 м (РН = 4,5 кг/кг) и 1,21 м (РН = 5,0 кг/кг). Следовательно, качественное изменение рудных нагрузок по радиусу колошника, определяемое соотношением высот слоев окатышей и кокса, при общей РН в цикле подач от 3,5 до 5,0 кг/кг одинаково.

При РН = 3,5 кг/кг в цикле двух отдельных подач РН в ПЗ составляет 3,1-3,3 кг/кг, в ПрЗ – 3,3-3,8 кг/кг, непрерывно повышаясь к центру печи. Осевой столб окатышей радиусом 0,71 м опоясывает кольцо, состоящее преимущественно из смеси кокса и окатышей ( $r_{внш} = 1,2$  м, РН = 6,1 кг/кг), так как высота формируемого слоя кокса не превышает 0,25 м. При РН = 4,0 кг/кг радиальная рудная нагрузка в ПЗ составляет 3,4-3,6 кг/кг, в ПрЗ – 3,6-4,5 кг/кг и 7,2 кг/кг на границе с кольцевой зоной из смеси рудного материала и кокса с внешним радиусом  $r_{см} = 1,43$  м, а затем непрерывно повышается к центру печи. Аналогично изменяются радиальные рудные нагрузки при общей РН = 4,5 кг/кг и 5,0 кг/кг в цикле двух отдельных подач. Рудная нагрузка в ПЗ, соответственно, составляет 3,6-4,0 кг/кг и 3,8-4,3 кг/кг, в ПрЗ – 4,0-5,3 кг/кг и 4,3-6,3 кг/кг, на границе со смешанным слоем – 8,2 кг/кг при  $r_{см} = 1,62$  м и 8,9 кг/кг при  $r_{см} = 1,77$  м, и непрерывно повышается в осевой зоне. Соотношение высот слоев окатышей и кокса на периферии при повышении рудной нагрузки в цикле из двух отдельных подач непрерывно растет с 0,70 д. ед. при РН = 3,5 кг/кг до 0,86 д. ед. при РН = 5,0 кг/кг при формировании центрального столба окатышей с радиусом, увеличивающимся от 0,71 м до 1,28 м, что усиливает развитие периферийного газового потока.

На рис. 2 рассмотрено распределение по радиусу материалов выше указанных подач при угле наклона поверхности засыпи  $\alpha_z = 10^\circ$ . Объем материалов  $V_z$ , формирующих поверхность засыпи с  $\alpha_z = 10^\circ$ , определялся как разность между объемом цилиндра радиусом  $r$  с высотой  $h_z$ , соответствующей глубине воронки (высоте слоя материалов данной поверхности засыпи у стен печи), и объемом конуса, описывающего воронку поверхности засыпи:  $V_z = \frac{2}{3} \pi h_z r^3 \operatorname{tg} \alpha_z$ .

Сравнительный анализ распределения слоев агломерата и кокса при загрузке отдельных



четырёхскиповых рудных и коксовых подач на пологую поверхность засыпи, показанного на рис. 1 (а), и на поверхность засыпи с углом наклона  $10^\circ$ , изображенного на рис. 2 (а), выявил качественно подобный их характер при рудных нагрузках 3,5 и 4,0 кг/кг. При увеличении угла наклона  $\alpha_z$  до  $10^\circ$  шихтовые материалы располагаются на поверхности засыпи более тонкими слоями, перераспределяясь по радиусу колошника ближе к оси печи. При этом коксовые слои при  $P_{H} = 3,5$  кг/кг достигают оси печи, а площадь осевого круга, не покрытого агломератом, уменьшается, так как его радиус изменяется с 1,17 до 0,62 м. Радиальные  $P_{H}$  при общей  $P_{H} = 3,5$  кг/кг снижаются с 4,0 кг/кг у стен печи до 3,8 кг/кг на границе ПЗ и ПрЗ и до 3,3 кг/кг на границе ПрЗ и центральной зоны (ЦЗ), уменьшаясь в направлении к оси до 0 кг/кг.

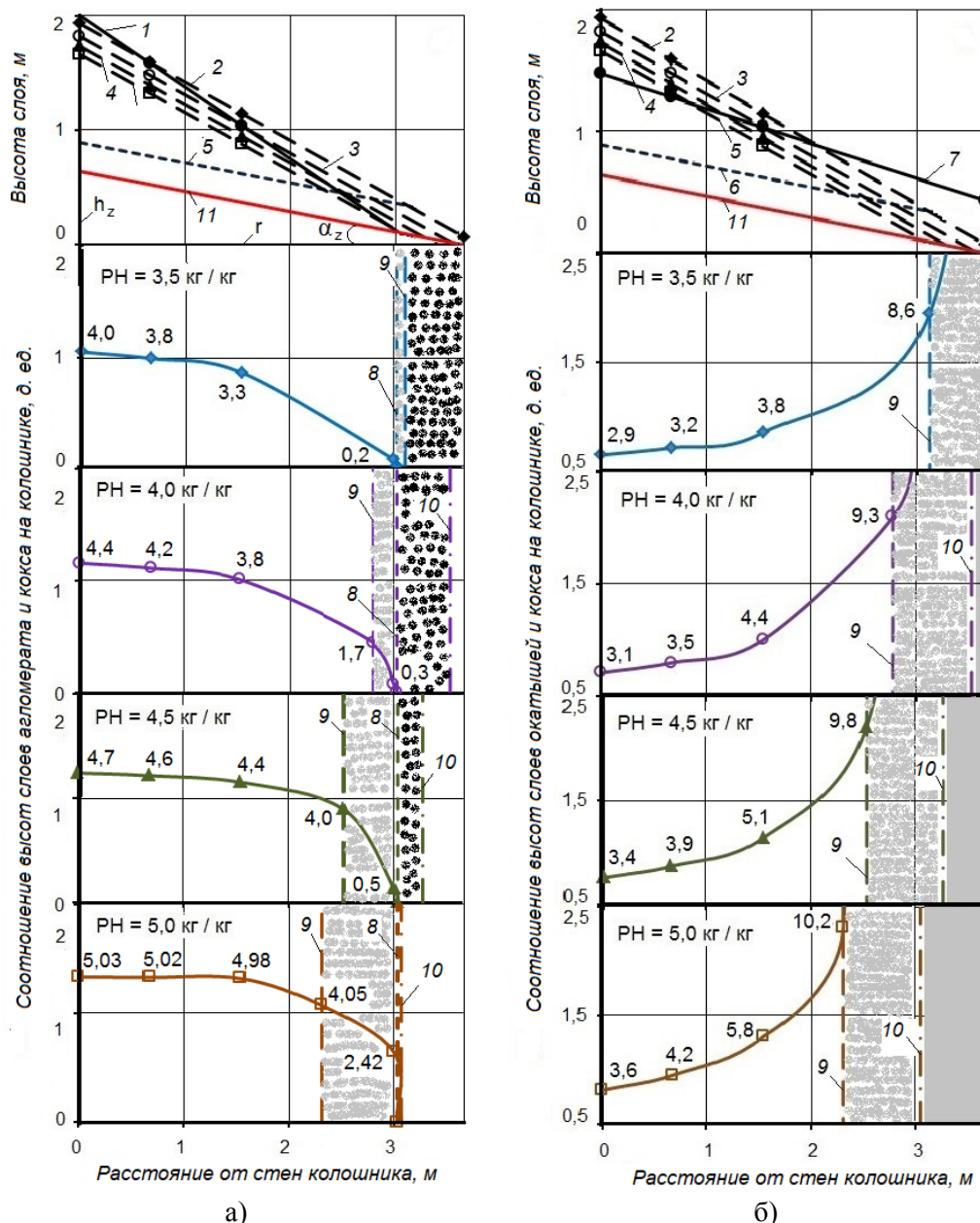


Рис. 2 – Расположение по радиусу колошника  $r$  слоев: агломерата (1), кокса при общей  $P_H$  в цикле подач  $4P \downarrow 4K \downarrow$ , кг/кг: 3,5 (2), 4,0 (3), 4,5 (4), 5,0 (5); кокса постоянной высоты  $h_k = 0,25$  м (6), окатышей (7); границ осевой зоны при  $h_k$  менее 0,25 м (8), не покрытой рудным материалом (9) и коксом (10); поверхности засыпи (11) с  $\alpha_z$  и разностью высот у оси и стен  $h_z$ : а – при загрузке подач  $4A \downarrow 4K \downarrow$ ; б – при загрузке подач  $4O \downarrow 4K \downarrow$ . Цифры у кривых – радиальные рудные нагрузки, кг/кг

Аналогично, радиальные РН при общей РН = 4,0 кг/кг снижаются с 4,4 кг/кг у стен печи до 4,2 кг/кг на границе ПЗ и ПрЗ и до 3,8 кг/кг на границе ПрЗ и ЦЗ, уменьшаясь к оси до 0 кг/кг. В этом случае у оси ДП наблюдается круг, не покрытый материалами, с меньшим радиусом 0,12 м против 0,94 м при  $\alpha_z = 0^\circ$ , а ширина осевого кольца кокса с  $r_{\text{внш}} = 0,62$  м увеличивается при некотором уменьшении ширины кольца смешанных материалов с  $r_{\text{внш}} = 0,87$  м.

При общей РН = 4,5 кг/кг также у оси уменьшается площадь круга ( $r_{\text{внш}} = 0,38$  м), не покрытого материалами, увеличивается ширина кольцевой зоны, заполненной коксом, с внешним радиусом 0,62 м, при уменьшении внешнего радиуса до 1,13 м кольцевой зоны, заполненной смесью агломерата и кокса. При этом наблюдается большее снижение радиальных рудных нагрузок в направлении к оси печи по сравнению с загрузкой данного цикла подач на пологую поверхность. Радиальные РН снижаются с 4,7 кг/кг у стен печи до 4,6 кг/кг на границе ПЗ и ПрЗ и до 4,4 кг/кг на границе ПЗ и ЦЗ, уменьшаясь к оси до 0 кг/кг.

При общей РН = 5,0 кг/кг повышение  $\alpha_z$  изменяет характер распределения радиальных РН: если при загрузке на пологую поверхность засыпи радиальные РН повышаются в направлении к оси печи, то загрузка материалов на наклонную поверхность засыпи приводит к снижению радиальных РН в направлении к оси печи. При этом в ПЗ и ПрЗ радиальные РН практически сохраняются на постоянном уровне около 5,0 кг/кг, затем снижаются до 4,05 кг/кг на границе с кольцевой зоной, заполненной смесью агломерата и кокса, с  $r_{\text{внш}} = 1,34$  м и до 2,42 кг/кг – практически на границе с узким кольцом кокса ( $b = 0,03$  м,  $r_{\text{внш}} = 0,62$  м).

Сравнение распределения слоев окатышей и кокса при загрузке отдельных четырехскиповых рудных и коксовых подач на пологую поверхность засыпи, показанного на рис. 1 (б), и при  $\alpha_z = 10^\circ$ , изображенного на рис. 2 (б), выявило их аналогичный характер при всех рассмотренных общих рудных нагрузках – частные радиальные РН возрастают в направлении от стен к оси печи. При повышении  $\alpha_z$  шихтовые материалы в большей мере перераспределяются от стен к оси печи, при этом высота слоев материалов у стен снижается, а у оси увеличивается, т. е. материалы распределяются более равномерным по высоте слоем, а при условии  $\alpha_z = \alpha_m$  шихтовый материал распределяется по сечению колошника слоем постоянной толщины.

При системе загрузки 4О↓4К↓ относительно выравнивается слой окатышей, а слой кокса распространяется ближе к оси и при общей РН = 3,5 кг/кг достигает центра колошника. В результате РН в ПЗ и ПрЗ снижаются с 3,1-3,8 до 2,9-3,8 кг/кг при общей РН = 3,5 кг/кг, с 3,4-4,5 до 3,1-4,4 кг/кг при РН = 4,0 кг/кг, с 3,6-5,3 до 3,4-5,1 кг/кг при РН = 4,5 кг/кг, с 3,8-6,3 до 3,6-5,8 кг/кг при РН = 5,0 кг/кг, а в центральной зоне повышаются с 6,1 до 8,6, с 7,2 до 9,3, с 8,2 до 9,8, с 8,9 до 10,2 кг/кг, соответственно, что будет способствовать снижению интенсивности газового потока у оси печи и его увеличению в периферийной зоне.

### Выводы

1. При загрузке отдельных увеличенных подач 4Р↓4К↓ с укладкой гребня материалов у стен доменной печи на пологую поверхность засыпи характер радиального распределения рудных нагрузок на кокс зависит от соотношения углов естественного откоса и объемов рудных материалов и кокса.

2. Цикл подач 4О↓4К↓ ( $\alpha_k > \alpha_{ок}$ ) при загрузке на пологую поверхность засыпи не обеспечивает создания экономичного осевого газового потока в печи, а повышение общей рудной нагрузки на кокс и угла наклона поверхности засыпи до  $10^\circ$  усиливает развитие периферийного газового потока, снижая его в центральной зоне колошника.

3. Созданию осевого газового потока способствует цикл подач 4А↓4К↓ ( $\alpha_k < \alpha_a$ ) при относительно низких общих рудных нагрузках на кокс до 4,5 кг/кг.

4. Повышение рудной нагрузки на кокс больше 4,5 кг/кг в цикле подач 4А↓4К↓, а также доли окатышей в шихте, требует совершенствования режимов загрузки доменных печей.

### Список использованных источников:

1. О технологии доменной плавки при использовании пылеугольного топлива / В.Г. Аносов [и др.] // Металургія : Збірник наукових праць ЗДІА. – Запоріжжя, 2009. – Вип. 20. – С. 37-43.
2. Семакова В.Б. Вдувание пылеугольного топлива в доменные печи ПАО «ММК им. Ильича» при их загрузке утяжеленными подачами / В.Б. Семакова, Ю.А. Зинченко, Ю.О. Шадлов-

- ский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – № 3. – С. 18-21.
3. Ефименко Г.Г. *Металлургия чугуна* / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. – К. : Вища школа, 1988. – 352 с.
  4. *Металлургия чугуна* / Е.Ф. Вегман [и др.]. Под ред. Ю.С. Юсфина. – М. : Академкнига, 2004. – 774 с.
  5. Управление радиальным распределением шихты и газов в доменных печах ОАО «ММК им. Ильича» при отдельной загрузке увеличенных масс кокса и агломерата / А.А. Томаш [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2005. – № 2. – С. 35-38.
  6. Semakova V.B. Economic analysis of reduction processes in blast furnaces / V.B. Semakova, V.V. Semakov, D.I. Gavriloglu // *Steel Transl.* – 2012. – Vol. 42. – № 4. – Pp. 319-323. – Mode of access: [DOI:10.3103/S0967091212040146](https://doi.org/10.3103/S0967091212040146).
  7. Тарасов В.П. *Газодинамика доменного процесса* / В.П. Тарасов. – М. : Metallurgy, 1990. – 216 с.
  8. Большаков В.И. Управление загрузкой и распределением шихты на колошнике и эффективность доменной плавки / В.И. Большаков; под ред. В.И. Большакова, И.Г. Товаровского // *Познание процессов доменной плавки : Коллективный труд*. – Днепропетровск : Пороги, 2006. – С. 87-109.
  9. Федулов Ю.В. Механика формирования слоя материалов на колошнике доменной печи / Ю.В. Федулов // *Сталь*. – 1991. – № 3. – С. 9-14.
  10. Исследование массопереноса при потере стабильности граничащих зернистых слоев / В.П. Тарасов [и др.] // *Сталь*. – 1991. – № 9. – С. 11-14.
  11. Исследование газопроницаемости доменной шихты при различном расположении слоев компонентов / В.П. Русских [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 1. – С. 13-16.

#### References:

1. Anosov V.G., Fomenko A.P., Krutas N.V., Tsaplina T.S. O tehnologii domennoj plavki pri ispol'zovanii pyleugol'nogo topliva [About blast furnace smelting technology using pulverized coal]. *Metallurgija – Metallurgy*, 2009, vol. 20, pp. 37-43. (Rus.)
2. Semakova V.B., Zinchenko Yu.A., Shadlovskiy Yu.O. Vduvanie pyleugol'nogo topliva v domennye pechi PAO «MМК im. Il'icha» pri ih zagruzke utjazhelennymi podachami [Powder coal injection into the blast furnaces at PAO MМК im. Il'icha charged with heavier supplies]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and Mining Industry*, 2016, no. 3, pp. 18-21. (Rus.)
3. Efimenko G.G., Gimmel'farb A.A., Levchenko V.E. *Metallurgija chuguna* [Iron metallurgy]. Kyiv, High School Publ., 1988. 352 p. (Rus.)
4. Vegman E.F., Zherebin B.P., Pokhvisnev A.N., Iusfin Iu.S. *Metallurgija chuguna* [Iron metallurgy]. Moscow, Academic book Publ., 2004. 774 p. (Rus.)
5. Tomash A.A., Kosolap N.V., Malimon A.A., Peftiev I.M., Dolia S.N. Upravlenie radial'nym raspredeleniem shihty i gazov v domennyh pechah ОАО «ММК им. Ильича» при razdel'noj zagruzke uvelichennyh mass koksa i aglomerata [Control of radial distribution of the charge and gases in blast furnaces belonging to «Ilych Iron and steel; Works» PJCS at separate charging of increased quantities of coke and sintered ore]. *Metallurgicheskie processy i oborudovanie – Metallurgical processes and equipment*, 2005, no. 2, pp. 35-38. (Rus.)
6. Semakova V.B., Semakov V.V., Gavriloglu D.I. Economic analysis of reduction processes in blast furnaces. *Steel in Translation*, 2012, vol. 42, no. 4, pp. 319-323. doi: [10.3103/S0967091212040146](https://doi.org/10.3103/S0967091212040146).
7. Tarasov V.P. *Gazodinamika domennogo processa* [Gas dynamics of the blast-furnace process]. Moscow, Metallurgy Publ., 1990. 216 p. (Rus.)
8. Bol'shakov V.I. Upravlenie zagruzkoj i raspredeleniem shihty na koloshnike i jeffektivnost' domennoj plavki [Control of charging and charge distribution on the top and efficiency of blast furnace smelt]. *Poznanie processov domennoj plavki: kollektivnyj trud – Cognition of processes of blast furnace smelting: collected papers*. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2006, pp. 87-109. (Rus.)
9. Fedulov Ju.V. Mehanika formirovaniya sloja materialov na koloshnike domennoj pechi [Mechan-



- ics of formation of the materials layer on the blast furnace top]. *Stal' – Steel*, 1991, no. 3, pp. 9-14. (Rus.)
10. Tarasov V.P., Semakova V.B., Tomash A.A., Maianov V.A., Tarasov P.V. Issledovanie massopere-nosa pri potere stabil'nosti granichashhih zernistykh sloev [Study of mass transfer during loss in stability of interfacial grained layers]. *Stal' – Steel*, 1991, no. 9, pp. 11-14. (Rus.)
11. Russkikh V.P., Semakov V.V., Gavriloglu D.I., Podgornyi M.A., Kharchenko I.I. Issledovanie gazopronicaemosti domennoj shihty pri razlichnom raspolozhenii sloev komponentov [Investigation of gas transmission of blast furnace burden at various location of component layers]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 1, pp. 13-16. (Rus.)

Рецензент: В.П. Русских  
канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 24.04.2019