

СНИЖЕНИЕ ДОЛИ КЛАССА БОЛЕЕ 80 ММ В ВАЛОВОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ КОКСЕ. Сообщение 1. ОБЗОР

Данил Игоревич Алексеев¹, канд. техн. наук, доцент (alekseev41047@mail.ru)

Елена Александровна Миленина² (e.milenina@uralsteel.com)

Анна Викторовна Швалева¹, канд. пед. наук (shvaleva.1978@mail.ru)

Марина Николаевна Степанова¹ (n2107775@edu.misis.ru)

Даниил Алексеевич Таракин¹ (n2102621@edu.misis.ru)

Илья Александрович Головашов¹ (n2200937@edu.misis.ru)

Виктория Евгеньевна Горшенина¹ (vikulya_gorshenina@mail.ru)

Елизавета Александровна Кузьмина¹ (n2002406@edu.misis.ru)

¹ НФ НИТУ «Московский институт стали и сплавов», г. Новотроицк, 462359. Россия

² АО «Уральская Сталь», г. Новотроицк, Оренбургская обл., 462353. Россия

Аннотация. В работе приведены результаты решения производственной задачи, предложенной студентам новотроицкого филиала «Московского института стали и сплавов» в рамках образовательно-производственных групп, по снижению выхода валового кокса классом >80 мм на коксовых батареях № 1, 3, 4 АО «Уральская Сталь» с учетом минимизации себестоимости шихты и достижения лучших значений показателей качества кокса M_{10} и M_{25} . В сообщении 1 приведен литературный обзор, начиная с 1960-х годов по настоящее время. Рассмотрено влияние марочного состава шихты и ее влажности, технологических параметров, таких как период коксования и температура в контрольных отопительных каналах, скорость коксования. В сообщении 2 будут приведены результаты математической обработки пассивного эксперимента данных АО «Уральская Сталь» с целью выявления факторов, влияющих на выход кокса класса >80 мм в условиях АО «Уральская Сталь», и сопоставление с результатами литературного обзора. В сообщении 3 будут приведены результаты построения модели доли кокса класса >80 мм, оптимизации и лабораторных коксований.

Ключевые слова: металлургический кокс, фракция кокса более 80 мм, додрабывание, шихтование, M_{10} и M_{25} , технологические параметры при производстве кокса

FACTORS INFLUENCING A YIELD OF A COKE FRACTION MORE THAN 80 MM IN A METALLURGICAL COKE. 1. REVIEW

Danil I. Alekseev¹; **Elena A. Milenina**²; **Anna V. Shvaleva**¹; **Marina N. Stepanova**¹; **Daniil A. Tarakin**¹; **Ilya A. Golovashov**¹; **Viktoriya E. Gorshenina**¹; **Elizaveta A. Kuzmina**¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Novotroitsk. Russia

² Ural Steel JSC, Orenburg region, Novotroitsk. Russia

Abstract. The results provide solutions to a production problem proposed by students of the Novotroitsk branch of the Moscow Institute of Steel and Alloys within the educational and production group, to reduce the yield of gross metal of class more than 80 mm in coke batteries № 1, 3, 4 of Ural Steel JSC, taking into account minimizing the cost of the charge and achieving better results in the quality indicators of M_{10} and M_{25} coke. Report 1 presents the results of a literature review conducted from the 1960s to the present. The influence of the grade composition of the charge and its humidity, technological parameters, such as the coking period and temperature in the control heating verticals, and the coking speed are considered. Communication 2 will present the results of mathematical processing of a passive experiment of data from Ural Steel JSC in order to identify factors influencing the yield of coke fractions greater than 80 mm under the conditions of Ural Steel JSC, and comparison with the results of a literature review. Message 3 will present the results of constructing a model for the coke fraction of more than 80 mm, optimization and laboratory coking.

Keywords: metallurgical coke, coke fraction more than 80 mm, additional crushing, blending, M_{10} and M_{25} , technological parameters in coke production

© Алексеев Д. И., Миленина Е. А., Швалева А. В., Степанова М. Н., Таракин Д. А., Головашов И. А., Горшенина В. Е., Кузьмина Е. А., 2025

Введение

Общей тенденцией во всех базовых отраслях России является дефицит высококвалифицированных кадров, не исключением является и коксохимическая промышленность. Каждое из коксохимических предприятий решает данный вопрос по-разному: увеличение оплаты труда, увеличение объема социальных гарантий, организация обучения сотрудников, в том числе по элитным программам подготовки руководящего состава, формирование корпоративных ценностей и сплоченности коллектива и т. д. Одним из направлений деятельности АО «Уральская Сталь» по подготовке высококвалифицированных кадров является реализация уникального совместного проекта с НФ НИТУ «МИСИС» – «образовательно-производственные группы». Студентам по разным направлениям подготовки предлагается решить реальные производственные задачи. Подобный подход позволяет предприятию вовлечь обучающихся в производственную жизнь, а студентам – сопоставить навыки, которыми они обладают, с теми, которые требуются в реальном производстве, углубить понимание теоретических дисциплин и установить их связь с производственными объектами и процессами. Работа студентов в рамках образовательно-производственных групп организована при непосредственном наставничестве высококвалифицированных специалистов АО «Уральская Сталь», что позволяет привить студентам культуру решения производственных задач.

Доменное производство АО «Уральская Сталь» выявило снижение технико-экономических показателей работы доменных печей при работе на коксе с повышенной долей класса >80 мм. Данный факт подтверждается и ранее проведенными исследованиями. На АО «Кривоужсталь» при наблюдении за работой доменной печи объемом 5000 м³ было установлено [1], что наличие в исходном коксе 35 % класса >60 мм приводит к значительному образованию мелочи (<3 мм), которая выносится с колошниковым газом из доменной печи. На нижнем горизонте шахты печи мелочь составляет 49,0 %, а в горне 26,8 %. Сделан вывод, что для эффективной работы доменной печи объемом 5000 м³ необходимо исключить класс >60 мм. В работе [2] отмечается, что производительность доменной печи возрастает на 3,2–3,4 %, а удельный расход кокса снижается на 1,6–1,7 % при использовании кокса класса крупности 60–40 мм по сравнению с применением фракции >60 мм. Технико-экономические показатели доменной печи при работе на коксе

>60 мм даже хуже, чем при работе на коксе крупностью >40 мм.

Для коксохимического производства АО «Уральская Сталь» была сформулирована задача снижения доли кокса класса >80 мм в валовом коксе. Можно обозначить как минимум два подхода к решению данной задачи: это механическое додрабливание крупных фракций кокса, а также составление такой шихты и обеспечение такого технологического режима, которые позволили бы минимизировать выход доли класса >80 мм. У каждого из обозначенных подходов к решению задачи имеются свои недостатки.

Механическое воздействие на кокс класса крупности >80 мм с помощью додрабливания [3, 4] приводит к разрушению исходных крупных кусков на фракции с меньшим размером, в том числе и <25 мм. Увеличение выхода класса <25 мм приводит к необходимости увеличения производительности коксохимического производства и продаже избыточной части кокса <25 мм. Для коксохимического производства, находящегося в составе металлургического предприятия, подобный подход можно считать нерациональным из-за необходимости инвестиций в додрабливающее устройство и его монтаж, увеличения износа оборудования и батарей в результате увеличения объема производства, а также сложного экономического обоснования с учетом того факта, что конечной продукцией является металлопродукция, а не кокс.

Подход, связанный с рациональным шихтованием и выбором оптимальных технологических параметров ведения процесса коксования неизбежно затрагивает тему моделирования и прогнозирования механических показателей качества кокса, например, M_{10} и M_{25} [5–14]. Иными словами, задачу прогнозирования и оптимизации доли выхода валового кокса класса >80 мм приходится дополнять моделями, связанными с прогнозированием показателей M_{10} и M_{25} .

Для решения задачи снижения доли выхода класса >80 мм в валовом коксе был выбран подход с применением математических моделей и с учетом того, что в литературе описано достаточно готовых и апробированных алгоритмов для построения [15–18].

Цель данной работы – установление рациональных технологических параметров, обеспечивающих минимальный выход валового кокса класса крупности >80 мм на коксовых батареях АО «Уральская Сталь» № 1, 3 и 4. Для этого были решены следующие задачи.

1. Выполнен литературный обзор, выявлены значимые шихтовые и технологические факторы,

Т а б л и ц а 1. Некоторые результаты из работы [19]

Номер опыта	Насыпная плотность шихты при коксовании, г/см ³	Скорость нагрева, град/мин	Гранулометрический состав, %, по классам крупности, мм					Показатели качества кокса	
			>60	40–60	25–40	10–25	≤10	d, мм	Г
1	0,650	1,3	63,2	13,2	6,4	3,6	13,6	60,0	230
2		2,0	71,2	20,2	1,3	0	4,3	62,6	265
3		3,0	58,9	33,4	1,6	2,6	3,5	60,5	259
4		4,5	17,7	56,9	18,5	3,0	3,9	47,6	246

Пр и м е ч а н и е. Г – газопроницаемость по К. И. Сыскову, безразмерная величина. Чем больше значение параметра Г, тем больше газопроницаемость.

влияющие на формирование крупнокускового кокса (Сообщение 1).

2. Осуществлена статистическая диагностика взаимосвязей между шихтовыми и технологическими параметрами с целью подготовки презентативной выборки для построения модели. Сопоставлены результаты с выводами из литературного обзора (Сообщение 2).

3. Построены математические модели, описывающие взаимосвязь между значимыми шихтовыми и технологическими факторами и содержанием класса >80 мм в валовом коксе, показателями M_{10} и M_{25} . Проведена оптимизация на основе моделей, предложено несколько составов оптимальных угольных шихт для коксования, позволяющих минимизировать содержание класса >80 мм, повысить качество кокса по показателям M_{10} и M_{25} , понизить себестоимость кокса. Предложенные оптимальные шихты были апробированы в лабораторных коксованиях, проведенных в коксохимической лаборатории АО «Уральская Сталь» на печи Николаева по ГОСТ 9521–2017 «Угли каменные. Метод определения коксумости» (Сообщение 3).

Обзор литературных материалов

В работе [19] приведены результаты исследования влияния скорости нагрева угольной шихты в лабораторной печи коксования с разовой загрузкой 6 кг на показатели гранулометрического состава, газопроницаемости по К. И. Сыскову, сред-

него диаметра кусков кокса. Основные результаты приведены в табл. 1, из анализа которой следует, что увеличение скорости нагрева шихты приводит к снижению доли выхода кокса класса >60 мм.

В исследовании [20] приведены результаты сопоставления работы Запорожского коксохимического завода при периодах коксования 14 ч 43 мин и 15 ч 45 мин. Марочный состав шихты для коксования был следующим, %: Г 23,5; Ж 35,5; К 21,0; ОС 20,0. Результаты коксований приведены в табл. 2.

Можно видеть (см. табл. 2), что доля кокса класса >80 мм с увеличением периода коксования возрастает (примерно на 9 %). Показатели качества кокса M_{10} и M_{40} можно считать примерно одинаковыми с учетом того, что по ГОСТ 5953–2020 (ISO 556:1980) допустимые расхождения в параллелях для M_{10} составляют 1,0 %, а для M_{40} – 3,0 %.

В работе исследователей УХИНа [21] было изучено влияние влажности производственной шихты Харьковского коксохимического производства на показатели гранулометрического состава и прочностные свойства кокса по показателям M_{10} и M_{40} . Все опытные коксования проводили в 200-кг лабораторной печи, марочный состав производственной шихты был следующим, %: Г 30; Ж 34; К 18; ОС 18. Установлено, что увеличение влажности с 7,8 до 13,5 % приводит к снижению выхода класса крупности кокса >80 мм с 18,8 до 11,4 %. Изменение влажности в том же диапазоне привело

Т а б л и ц а 2. Результаты испытания кокса при различном периоде коксования [20]

Период коксования	Температура в отопительных каналах, °С		Механическая прочность по барабану Сундгрена, кг	Прочность по Микум-барабану, %		Гранулометрический состав, %, по классам крупности, мм					
	м. с.	к. с.		M_{10}	M_{40}	>80	80–60	40–60	25–40	<25	>60
14 ч 43 мин	1318	1360	338	6,6	78,8	20,5	35,2	33,9	8,0	2,4	55,7
15 ч 45 мин	1278	1318	343	6,8	80,0	29,9	36,6	29,9	22,4	1,2	66,5

Таблица 3. Технический анализ и показатели пластомерии [23]

Марка угля	Технический анализ, %		Пластомерия, мм		ΣОК
	A^d	V^d	x	y	
К10	8,8	21,8	36	12	44,5
К2	7,3	18,9	33	9	51,0

Примечание. Угли соответствуют маркам КО и КС по ГОСТ 25543–2013.

к ухудшению показателей M_{10} и M_{40} : 8,8 и 79,0 % при влажности шихты 7,8 % против 10,8 и 76,5 % при влажности 13,5 %.

В работе [22] проведено исследование по дроблению кокса классов крупности >60 и >80 мм. Механическое дробление кокса в экспериментальной зубчатой дробилке конструкции УХИНа улучшило равномерность кокса и его физико-механические свойства. Однако имеются и недостатки этой технологии. При настройке дробилки на дробление класса >80 мм (14,5–28,7 % в экспериментах от исходного валового кокса) полной ликвидации этого класса не наблюдалось, происходило снижение данной фракции до 10–15 %, при этом отмечалось увеличение выхода фракции кокса <25 мм на 6,0–7,5 % от массы кокса класса >80 мм, пошедшей на дробление. При настройке дробилки на дробление класса >60 мм (46,8–60,3 % от исходного валового кокса) кокс класса >80 мм ликвидируется полностью, однако увеличивается содержание кокса <25 мм на 8–10% от массы кокса крупностью >60 мм, пошедшей на дробление, в связи с чем эффективность данной технологии снижается. В работе также отмечается, что при снижении периода коксования снижается крупность кокса и выход кокса класса >80 мм. Кроме того, повышение конечной температуры коксования до 1100 °С по оси камеры коксования также приводит к снижению доли крупных классов кокса.

В ходе статистического анализа работы Кузнецкого металлургического комбината [23] за 12 лет были получены важные практические результаты. Установлено, что повышенное содержание марок углей с характеристиками, представленными в табл. 3, позволяет значительно снизить долю кокса класса >80 мм в валовом коксе. Указанные марки угля можно соотнести с марками КО и КС по ГОСТ 25543–2013. В этой же работе установлено, что прочностные свойства кокса класса крупности 60–40 мм выше, чем класса >80 мм на 25–30 кг (остаток в барабане Сундгрена), мелочь при испытании в барабане увеличивается примерно на 30 кг (<10 мм).

На Авдеевском коксохимическом заводе [24] исследовали влияние способов тушения на качество кокса. Сопоставление результатов ситового анализа кокса, потушенного сухим и мокрым способом, на всех этапах эксперимента показало, что значительных различий по гранулометрическому составу кокса не имеется, наблюдается только различие в прочности кокса (показатели M_{10} и M_{25}). В зависимости от производительности УСТК (выдача 1, 2, 3 камеры/ч) показатель M_{40} кокса сухого тушения был соответственно больше на 5,4; 3,8 и 1,0 %, чем кокса мокрого тушения.

В работе [2] установлено, что определяющим фактором, влияющим на крупность получаемого кокса, является скорость нагревания шихты. В качестве независимых переменных факторов были выбраны характеристики режима коксования, определяющие скорость повышения температуры в угольной загрузке и конечной температуры в центре коксового пирога. В качестве выходных откликов были приняты прочность кокса по показателям M_{40} , M_{25} , M_{10} , содержание в товарном коксе класса >80 мм. Установлено, что с повышением температуры в обогревательных простенках и удлинением периода коксования кокс становится более мелким и равномерным по крупности, причем влияние периода коксования на эти показатели незначительно. Повышение периода коксования при одинаковой температуре в обогревательных простенках приводит к повышению прочности кокса на истираемость за счет увеличения скорости нагревания угольной загрузки и повышения степени готовности кокса. Сделан вывод, что для улучшения качества кокса температуру в обогревательных простенках необходимо повышать до допустимого уровня, принимая во внимание состояние кладки стен печных камер. Период коксования необходимо устанавливать таким образом, чтобы перед выдачей кокса из печной камеры температура на участке контакта кокса с кладкой не превышала 1180–1190 °С, а период коксования длился не меньше 14 ч.

На основе работы батареи № 1-бис Мариупольского коксохимического завода были получены результаты, представленные в табл. 4 [25], позволяющие прогнозировать динамику изменения содержания класса кокса >80 мм в зависимости от периода коксования. Установлено, что с увеличением температуры в отопительных каналах выход класса >80 мм снижается.

В исследовании [26] представлена зависимость доли кокса класса >80 мм в валовом коксе от суммы отощающих компонентов. Диапазон изменения доли класса >80 мм составил 20–30 %, диапа-

Т а б л и ц а 4. Основные показатели работы коксовых печей [25]

Показатели	Оборот печей, ч								
	24,1	20,5	18,6	18,0	17,8	15,9	16,0	16,4	17,3
Температура в контрольных отопительных каналах, °С:									
машинная сторона	1141	1201	1246	1261	1275	1306	1314	1309	1286
коксовая сторона	1160	1235	1285	1305	1316	1352	1356	1353	1329
Гранулометрический состав (%) по классам, мм:									
>80	15,2	10,7	8,1	8,0	8,5	7,6	7,4	7,8	7,5
80–60	34,3	28,9	22,7	25,1	24,5	21,1	19,8	19,7	18,5
60–40	35,7	40,8	45,7	45,7	45,2	46,3	45,3	45,4	45,4
40–25	11,4	16,2	20,3	17,8	18,5	21,6	24,6	23,4	24,8
<25	3,4	3,4	3,2	3,4	3,3	3,4	3,5	3,6	3,4
Механическая прочность кокса, %:									
<i>M</i> ₂₅	88,6	88,6	88,1	87,6	87,7	87,3	87,4	87,1	87,9
<i>M</i> ₁₀	6,8	6,9	6,8	7,0	6,9	7,0	7,0	7,1	6,7
Технический анализ кокса, %:									
<i>W</i> ^r	4,8	4,7	4,6	4,5	4,5	4,5	4,6	4,5	4,6
<i>A</i> ^d	10,7	10,4	10,4	10,3	10,3	10,3	10,4	10,5	10,5
<i>V</i> ^{daf}	1,1	1,1	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1
<i>S</i> ^d	1,7	1,7	1,69	1,66	1,67	1,68	1,68	1,69	1,67

зон изменения суммы отошающих компонентов 19–31 %. При этом наблюдается тренд по снижению доли класса >80 мм при увеличении суммы отошающих компонентов.

В работе [27] предложено учитывать гранулометрический состав кокса при оценке технологической ценности кокса, предложен индекс качества кокса I_k :

$$I_k = d_{\text{экв}} + kCSR,$$

где $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр кусков кокса, мм; CSR – прочность кокса после реакции с CO_2 , %; k – эмпирический коэффициент (1,45 – для кокса сухого тушения; 2,60 – для кокса мокрого тушения).

Анализ индекса качества кокса показывает, что возрастание эквивалентного диаметра приводит к увеличению ценности кокса при неизменном способе тушения кокса и прочности кокса CSR . Необходимо отметить, что индекс I_k построен на обработке статистических данных в диапазоне: $d_{\text{экв}}$ от 42,0 до 48,0 мм; доля кокса класса >80 мм в среднем – 7,1 %. Поэтому результаты работы [27] не противоречат ранее выполненным работам, поскольку $d_{\text{экв}}$ не превысил значений (например, 60,0 мм и более) в грануломе-

трическом составе кокса, который был проанализирован [27], преобладает крупность кокса класса 40–60 мм.

Выводы

Установлено, что наиболее значимыми параметрами, от которых зависит выход кокса класса >80 мм, являются скорость коксования, температура в отопительных каналах и период коксования, а также содержание в производственной шихте углей марок КО и КС. Кроме того, выход в валовом коксе класса >80 мм снижается в случае повышенного содержания влаги в шихте, однако влажность шихты негативно влияет на показатели M_{10} и M_{25} .

Таким образом, можно выделить следующие направления для снижения выхода класса >80 мм в валовом коксе:

- увеличение скорости коксования позволяет снизить выход класса >80 мм (повышение температуры в отопительных каналах при неизменном периоде коксования);

- повышение доли углей марок КО и КС в шихте позволяет снизить содержание кокса класса >80 мм в валовом коксе.

Список источников

1. Бузверя М. Т., Москалина Ф. Н., Шулико С. Т. О поведении кокса в доменной печи объемом 5000 м³ // Кокс и химия. 1981. № 6. С. 17–19.

2. Наумов А. С., Скляр М. Г. Улучшение качества металлургического кокса путём применения современных технологических процессов подготовки шихты, производства и обработки кокса // Кокс и химия. 1982. № 1. С. 10–16.

3. Мучник Д. А. Формирование свойств доменного кокса. М.: Металлургия, 1983. 182 с.

4. Мучник Д. А., Гуляев В. М. Расчеты и прогнозирование показателей качества металлургического кокса с использованием ПК: учеб. пособие. Днепропетровск: Изд-во ДГТУ, 2007. 225 с.

5. Станкевич А. С., Золотухин Ю. А. Определение технологической ценности углей на основе математической модели прогноза показателей прочности и реакционной способности кокса из шихт с их участием // Кокс и химия. 2015. № 7. С. 2–14.

6. Еремин И. В., Гагарин С. Г. Расчет шихт для коксования на основе петрографической модели // Кокс и химия. 1992. № 12. С. 9–15.

7. Гагарин С. Г. Оценка петрографической модели прогноза прочности кокса на примере углей Монголии // Кокс и химия. 2011. № 4. С. 21–26.

8. Золотухин Ю. А., Красковская Т. Ф., Купрыгин В. В. Анизотропия отражения витринита углей и антрацитов // Кокс и химия. 2023. № 1. С. 2–20.

9. Золотухин Ю. А., Беркутов Н. А., Купрыгин В. В., Куприянова С. Н. Прогноз качества промышленного кокса мокрого и сухого тушения на АО «ЕВРАЗ НТМК» по данным пассивного промышленного эксперимента. 2. Прогноз M_{25} и M_{10} промышленного кокса // Кокс и химия. 2021. № 11. С. 19–30.

10. Золотухин Ю. А., Беркутов Н. А., Купрыгин В. В., Куприянова С. Н. Прогноз качества промышленного кокса мокрого и сухого тушения на АО «ЕВРАЗ НТМК» по данным пассивного промышленного эксперимента. 1. Прогноз CSR и CRI промышленного кокса // Кокс и химия. 2021. № 10. С. 9–20.

11. Золотухин Ю. А., Андрейчиков Н. С., Ерёмин А. Я. и др. Развитие теории и практики шихтования углей на основе исследований закономерностей формирования качества кокса от свойств углей и шихт с использованием дополнительных критериев оценки их качества // Кокс и химия. 2021. № 3. С. 52–62.

12. Золотухин Ю. А., Осадчий С. П., Денисенко Е. В. и др. Прогноз качества промышленного кокса на ОАО «АЛТАЙ-КОКС» по результатам лабораторных и ящичных коксований. 2. Ящичные коксования // Кокс и химия. 2019. № 8. С. 6–24.

13. Золотухин Ю. А., Осадчий С. П., Денисенко Е. В. и др. Прогноз качества промышленного кокса ОАО

«АЛТАЙ-КОКС» по результатам лабораторных и ящичных коксований. 1. Лабораторные коксования // Кокс и химия. 2019. № 5. С. 12–37.

14. Золотухин Ю. А., Голубцов С. Н., Каракаш К. П. Влияние изменений сырьевой базы ЦОФ «Кузнецкая» и ОУОУ «ЕЗСМК» на качество кокса. 1. Лабораторные коксования // Кокс и химия. 2017. № 7. С. 8–20.

15. Смирнов А. Н., Петухов В. Н., Алексеев Д. И. Анализ принципов построения математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} с целью классификации и разработки концепции «гибридной модели» // Кокс и химия. 2015. № 5. С. 13–18.

16. Díez M. A., Alvarez R., Barriocanal C. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking // Int. J. of Coal Geology. 2002. Vol. 50, Is. 1–4. P. 389–412.

17. North L., Blackmore K., Nesbitt K., Mahoney M. R. Methods of coke quality prediction: A review // Fuel. 2018. Vol. 219. P. 426–445. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.090>

18. North L., Blackmore K., Nesbitt K., Mahoney M. R. Models of coke quality prediction and the relationships to input variables: A review // Fuel. 2018. Vol. 219. P. 446–466. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.062>

19. Казиник Е. М., Макаров Г. Н. Влияние температурного режима на качество кокса // Кокс и химия. 1962. № 6. С. 20–25.

20. Еленский Ф. З. Влияние периода коксования на качество кокса // Кокс и химия. 1962. № 11. С. 27–28.

21. Иванов Е. В., Фартушина Р. М. Влияние влажности шихты на физические свойства кокса // Кокс и химия. 1965. № 7. С. 31–32.

22. Богдавленский К. А., Семисалов А. П., Защквара В. Г. и др. Улучшение физико-механических свойств металлургического кокса путем дробления крупных классов // Кокс и химия. 1969. № 6. С. 22–39.

23. Мыкольников И. А., Ефимов С. П., Юферов А. А., Леонтьев А. К. Коксование шихты с увеличенным участием отощенно-спекающихся углей // Кокс и химия. 1971. № 8. С. 15–17.

24. Скляр М. Г., Семисалов А. П., Сытенко Н. В. и др. Улучшение качества доменного кокса при сухом тушении // Кокс и химия. 1971. № 10. С. 21–23.

25. Мельничук А. Ю., Браун Н. В., Боранбаев Б. М. Оценка физико-механических свойств металлургического кокса // Кокс и химия. 1991. № 9. С. 11–18.

26. Лялюк В. П., Шмельцер Е. О., Ляхова И. А., Касим Д. А. Влияние свойств сырья и технологии коксования на гранулометрический состав кокса // Кокс и химия. 2014. № 10. С. 29–35.

27. Минин С. И., Миронов К. В., Кошкаров Д. А. и др. Учет влияния гранулометрического состава кокса на его металлургическую ценность // Кокс и химия. 2022. № 9. С. 10–14.

Статья поступила в редакцию 27.09.2024;
одобрена после рецензирования 30.10.2024;
принята к публикации 17.01.2025