

УДК 662.74:662.8.057.2
DOI 10.26456/vtchem2026.1.2

Влияние гранулометрического и марочного состава углей Кузбасса на выход и прочностные характеристики кокса

Р.Ю. Ковалев, А.П. Никитин

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово

В работе представлены результаты модельных экспериментов по коксованию индивидуальных марок углей (Д, ДГ, Г, ГЖ, Ж, К) Кузнецкого бассейна и составленных на их основе шихт. Исследовано влияние степени метаморфизма, гранулометрического состава (классы <0,2 мм, <0,5 мм, 0,5-3 мм, 3-10 мм) и марочного состава шихты на выход кокса и его прочностные характеристики, оцениваемые по индексам сбрасывания S_{10} и S_{25} . Установлено, что угли марок ГЖ, Ж и К с размерами частиц $\leq 0,5$ мм пригодны для использования в шихте, формируя спекшийся кокс. Показано, что отделение класса <0,5 мм для угля марки Ж повышает прочность кокса, а максимальная прочность наблюдается у кокса из угля марки ГЖ (класс $\leq 0,5$ мм). Определен оптимальный состав шихты: ГЖ (53,98%), Ж (24,32%), К (21,70%), обеспечивающий получение высокопрочного кокса с индексом $S_{25}=99,4\%$.

Ключевые слова: уголь, коксование, кокс, шихта, выход кокса, гранулометрический состав, индекс сбрасывания, прочность кокса.

Введение

Каменноугольный кокс, представляющий собой науглероженный остаток пиролиза ($T > 800$ °С) угля или шихты, является критически важным восстановителем и топливом в доменном процессе производства чугуна [1, 2]. Для получения кокса заданного качества при рациональном использовании ресурсов коксующихся углей применяют сложные угольные шихты. Типовая структура металлургической шихты включает: спекающую основу (угли марок ГЖ, Ж), коксовые присадки (марки К, КО, ОС) и отощающие присадки (марки КС, КСН) [3].

Одним из ключевых факторов, влияющих на качество конечного продукта, является гранулометрический состав шихты. В литературе существуют разнонаправленные данные о влиянии мелких фракций. С одной стороны, показано, что высокое содержание частиц <0,5 мм может снижать горячую прочность кокса (CSR) [6]. С другой стороны, ряд исследований демонстрирует, что увеличение доли углей марки К в шихте позволяет получать кокс с высокими показателями CSR и

механической прочности (M_{25}) даже при наличии мелких частиц [7, 8]. Работы [9-11] подтверждают, что рост содержания фракции $<0,5$ мм в шихтах с высоким содержанием угля марки К может способствовать повышению значений M_{25} и CSR для коксов.

Таким образом, актуальной задачей является установление четкой взаимосвязи между марочным и гранулометрическим составом углей конкретного бассейна (Кузнецкого) и технологическими показателями коксования – выходом и прочностью кокса. Целью данной работы являлось проведение модельных экспериментов по коксованию индивидуальных марок углей и их смесей для определения оптимального состава шихты, обеспечивающего высокий выход и прочность кокса. Новизна исследования заключается в комплексной оценке влияния класса крупности для различных марок углей Кузбасса на индекс сбрасывания кокса.

Экспериментальная часть

В работе использовали угли Кузнецкого бассейна марок Д, ДГ, Г, ГЖ, Ж, К, основные характеристики которых приведены в Таблице 1. Анализы проводили по стандартным ГОСТ: выход летучих веществ (V^{daf}) – ГОСТ Р 55660-2013, зольность (A^d) – ГОСТ Р 55661-2013, влажность (W^a) – ГОСТ Р 52911-2020, индекс вспучивания (SI) – ГОСТ Р 59250-2020, сумма отошающих (фюзинитовых) компонентов ΣOK – ГОСТ 55662-2013.

Таблица 1

Основные характеристики используемых углей

№	Марка углей, название шахты/разреза	V^{daf} , %	A^d , %	W^a , %	SI	ΣOK , %
1	Д, ш. Грамотеинская	44,0	8,5	5,1	0,5	7
2	ДГ, р. Восточный	40,7	12,6	5,9	1,5	7
3	Г, ш. Комсомолец, пласт Бреевский	44,0	6,5	2,4	2,5	6
4	ГЖ, ш. Распадская	37,5	11,8	1,5	8,0	10
5	Ж, ш. Тихова	34,3	6,5	1,2	9,0	29
6	Ж, СДС-Уголь	29,1	12,1	1,2	Н.О.	46
7	К, уч. Коксовый	22,8	4,35	1,2	8,5	11

Угли измельчали и разделяли методом ситового обора на следующие классы: $<0,2$ мм, $<0,5$ мм, $0,5-3$ мм, $3-10$ мм. Коксование навесок массой 8 г проводили в керамических тиглях в муфельной печи при температурах $800-1200^\circ\text{C}$ с выдержкой 1 час. Определяли общий выход кокса (B_k) и выход спекшегося кокса (B_k^c).

Механическую прочность оценивали методом сбрасывания с высоты 1,8 м. Индекс сбрасывания S_x определяли, как массовую долю

кокса, оставшегося на сите с размером ячеек X мм (X = 10, 25) после испытания.

Результаты и обсуждение

При коксовании ($T = 900^{\circ}\text{C}$) углей низких стадий метаморфизма (Д, ДГ, Г) с размером частиц $<0,2$ мм, а также угля Ж (образец №6), образовывался порошкообразный кокс, что коррелирует с их низкими значениями индекса вспучивания SI (таблица 1). Для углей марок ГЖ, Ж и К (образцы №4, №5 и №7) наблюдалось образование спекшейся массы. Данные по выходам и прочности приведены в Таблице 2.

Таблица 2
Данные о выходах коксов полученных путем коксования углей (класс ≤ 0.2 мм) при 900°C , в течение 1 часа

№	Марка угля	V_k , %	V_k^C , %	S_{10} , %	S_{25} , %
1	Д, ш. Грамотеинская	40,0	0	–	–
2	ДГ, р. Восточный	58,3	0	–	–
3	Г, ш. Комсомолец, пласт Бреевский	65,5	0	–	–
4	ГЖ, ш. Распадская	63,2	59,4	95,8	83,3
5	Ж, ш. Тихова	67,7	67,0	93,9	93,9
6	Ж, СДС-Уголь	63,5	0	–	–
7	К, уч. Коксовый	73,2	70,0	88,2	70,6

Наибольший выход спекшегося кокса характерен для угля марки К. Для углей ГЖ и Ж (образцы №4 и №5) значения V_k и V_k^C близки, что указывает на перспективность их мелких классов ($\leq 0,2$ мм) в качестве компонентов шихты. 7). Также при коксовании угля марки Г с дополнительной выдержкой в течение 1 часа, при 430°C (температура пластификации угля согласно [12]) кокс представлен также в виде порошка. Следует отметить, что для получаемого кокса из угля марки Г доля частиц $\geq 0,2$ мм была $\sim 40\%$, что говорит о частичном спекании.

Исследование влияния гранулометрии показало, что отделение мелких частиц ($<0,5$ мм) для углей марок ГЖ и Ж увеличивает общий выход кокса (рисунок 1). Вероятно, из мелких частиц летучие вещества выделяются, не успевая полностью конденсироваться и участвовать в спекании, тогда как в более крупных классах ($\geq 0,5$ мм) процессы конденсации пиролизных смол протекают эффективнее, способствуя образованию монолита [4, 5].

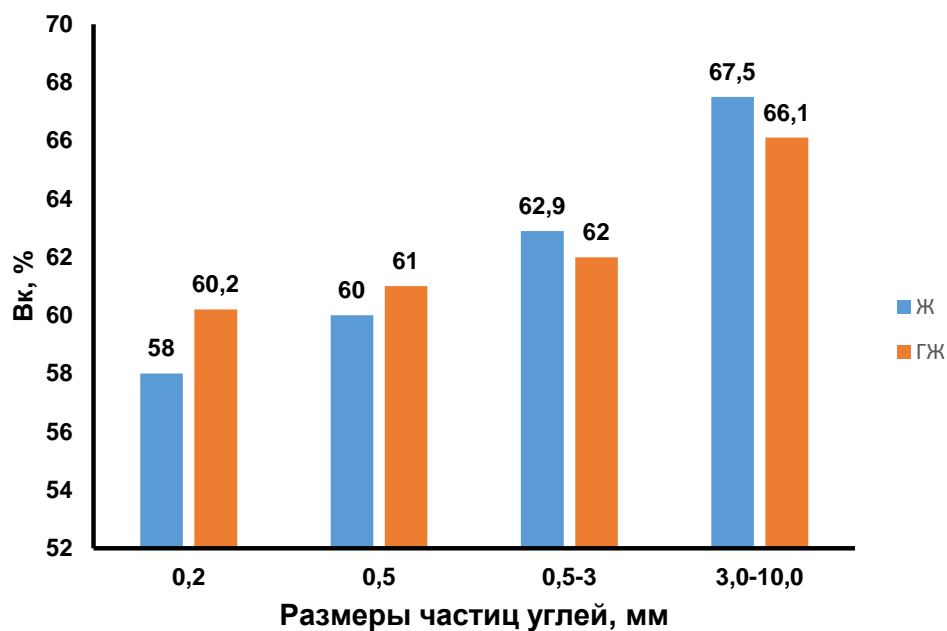


Рис. 1. Зависимость выхода коксов V_k , для различных классов частиц углей марок ГЖ и Ж

Прочностные характеристики кокса, оцениваемые по индексам S_{10} и S_{25} , также зависят от гранулометрии исходного угля (рисунки 2 и 3). Для кокса из угля марки ГЖ максимальная прочность ($S_{10} \approx S_{25} \approx 97,5\%$) достигается при использовании класса $\leq 0,5$ мм. Для угля марки Ж наблюдается рост прочности с увеличением размера частиц от 0,5 мм до 3-10 мм. Минимальная прочность у кокса из угля марки К (класс $< 0,2$ мм), однако увеличение времени выдержки при 900 °С до 5 часов повышает S_{10} и S_{25} до 96-99%.

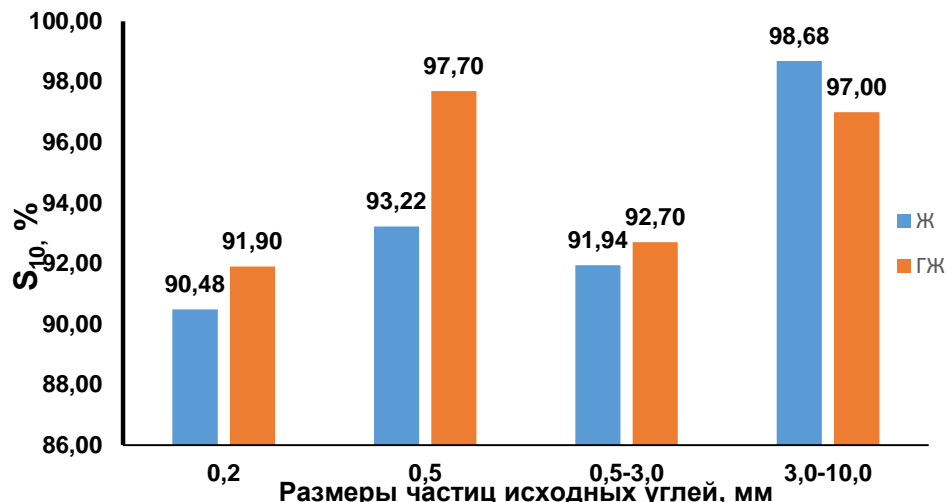


Рис. 2. Зависимость индекса сбрасывания S_{10} , для различных классов частиц углей марок ГЖ и Ж

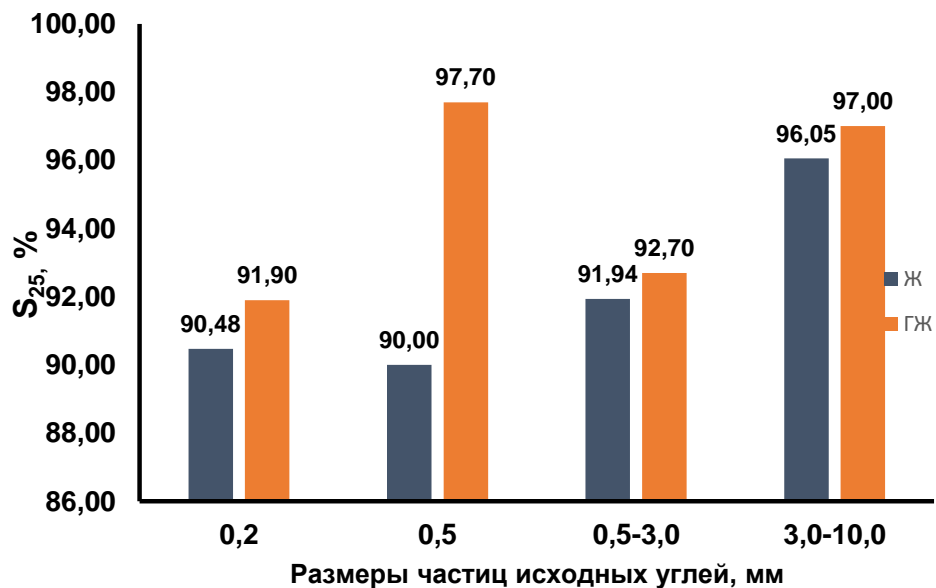


Рис. 3. Зависимость индекса сбрасывания S_{25} , для различных классов частиц углей марок ГЖ и Ж

При использовании угля марки Ж (образец №6), размерами частиц 0,5-3,0 мм, с коксованием при 900 °С, в течение 1 часа, получали кокс с выходом $V_k = 68,5 \%$, и содержанием спекшейся части $V_k^C = 48 \%$. Для данного образца кокса характерны $S_{25} = S_{10} = 83\%$. При коксовании (1000 °С) углей марок Г и ДГ, класса 0,5-3,0 мм, получали коксы с выходом $V_k = 57,8 \%$ для угля марки ДГ и выходом $V_k = 55 \%$ и $V_k^C = 13,5 \%$.

Методом ситового анализа показано для кокса угля марки ДГ доля частиц более 3 мм ~ 4 %, а для угля марки Г ~ 30 %. Данный факт также говорит о частичном спекании частиц углей во время коксования.

Зольность кокса возрастает по сравнению с зольностью исходного угля и зависит от его granulometрии (Рис. 4, 5). Для угля ГЖ отделение мелких фракций снижает зольность, для угля Ж – повышает.

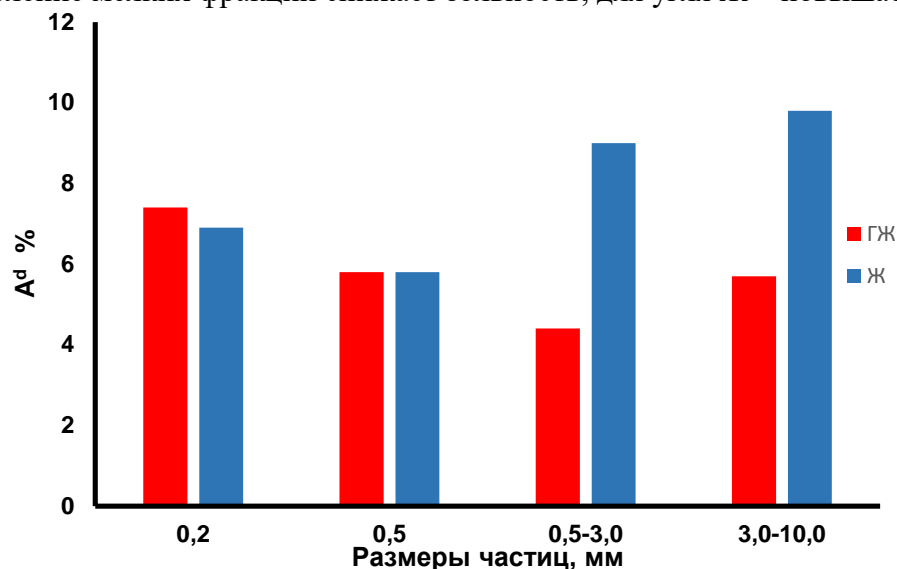


Рис. 4. Распределение зольности исходных углей по granulometрическим классам частиц

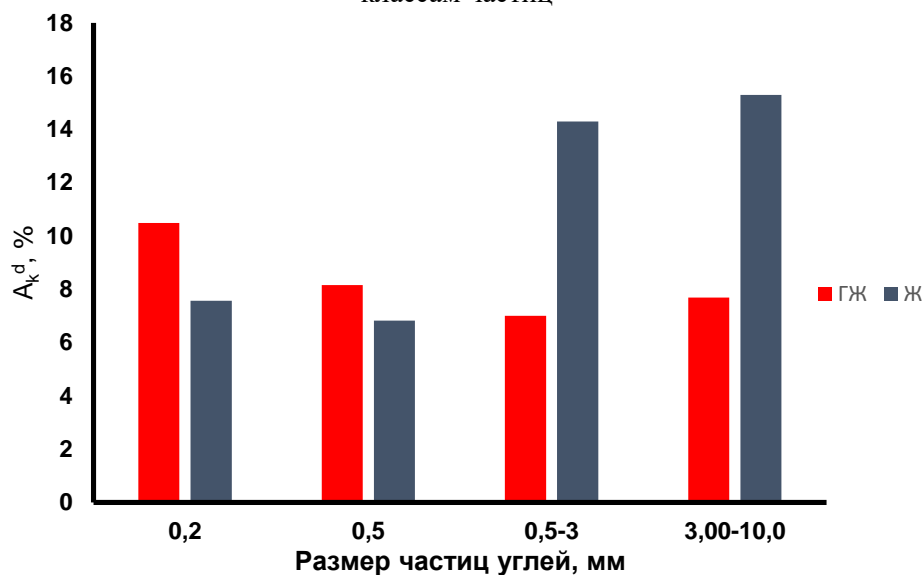


Рис. 5. Распределение зольности коксов по granulometрическим классам частиц

Повышение температуры коксования приводит к снижению выхода кокса (B_k и B_k^C) для обеих марок, причем для угля Ж это

снижение более интенсивное (рисунки 6, 7). Можно предположить, что при коксовании угля марки Ж, увеличение объема кокса в результате вспучивания в процессе коксования приводило к частичной термической деструкции кокса, тем самым снижая V_k^C . На рис.8 показаны значения S_{25} для различных температур. Прочность кокса (S_{25}) с ростом температуры увеличивается для угля ГЖ и уменьшается для угля Ж (рисунок 8), что может быть связано с интенсивным вспучиванием последнего (высокий SI, таблица 1) и образованием внутренних дефектов.

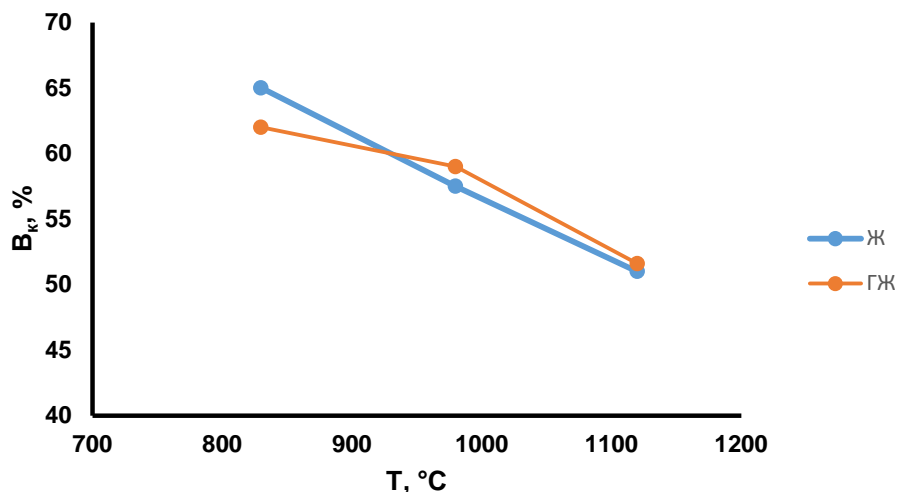


Рис. 6. Зависимость выхода коксов V_k , от температуры коксования T

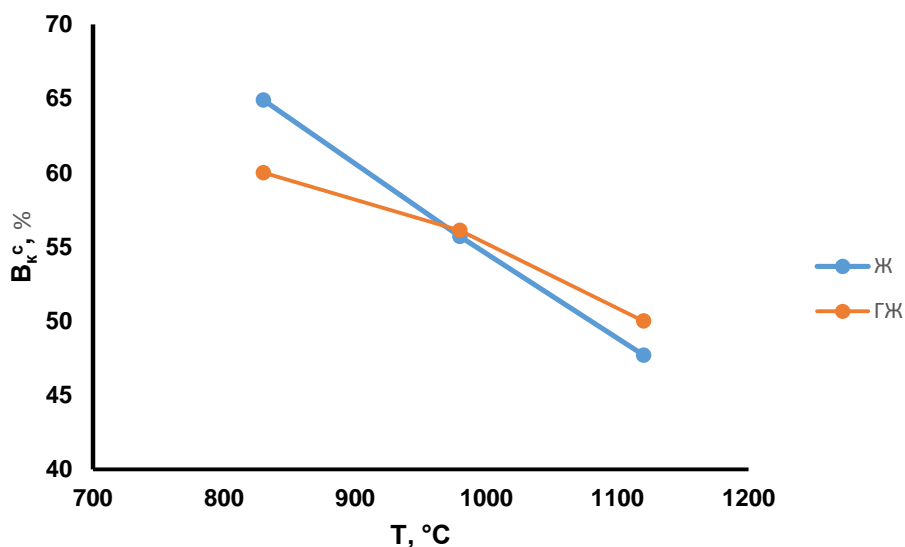


Рис. 7. Зависимость выхода спекшегося кокса V_k^C от температуры коксования T

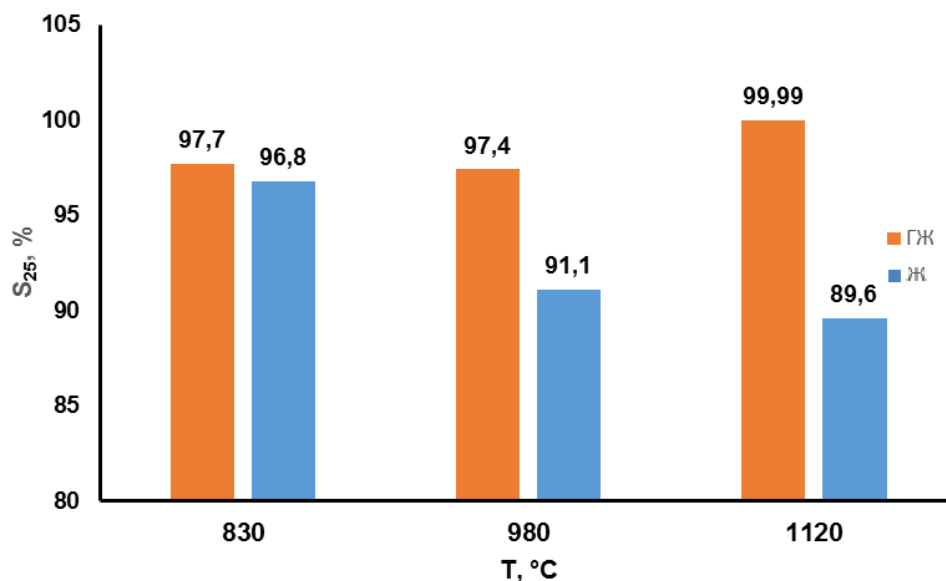


Рис. 8. Зависимость индекса S_{25} от температуры коксования для углей марок ГЖ и Ж

Анализ зависимости прочностных характеристик кокса от температуры коксования выявил разнонаправленное влияние для углей разных марок. Как видно из рисунка 8, индекс сбрасывания S_{25} для кокса из угля марки ГЖ демонстрирует положительную корреляцию с температурой, тогда как для кокса из угля марки Ж наблюдается обратная зависимость. Объяснением данного явления может служить различное поведение углей в процессе пластификации и вспучивания. Для угля марки Ж, характеризующегося более высоким индексом вспучивания (SI), вероятно, именно это и приводит к формированию в структуре кокса макропор и микротрещин. Эти структурные дефекты снижают механическую целостность материала, что и проявляется в уменьшении значения S_{25} .

Распределение частиц полученного кокса из угля марки К по классам крупности, свидетельствующее о процессах спекания и термической деструкции, представлено в таблице 3. При коксовании следующего класса (<0,5 мм) зафиксирован максимальный выход спекшегося кокса ($B_k^C = 64,4\%$) и абсолютная прочность ($S_{10} = S_{25} = 100\%$). Использование более крупных классов (0,5-3 мм и 3-10 мм) приводило к образованию несвязанных частиц кокса с общим выходом B_k 75,5% и 73,0% соответственно.

Таблица 3
Распределение классов коксов, полученных из угля марки К при 1000 °С, в течение 1 часа

№	Класс частиц угля марки К, мм	Распределение кокса по размерам частиц, %		
		<0,5 мм	0,5-3 мм	3-10 мм
1	0,5-3	0,00	80,55	19,46
2	3-10	2,56	14,10	83,34

Для дальнейшего исследования влияния состава на свойства конечного продукта составлены и прококсованы модельные шихты на основе углей марок ГЖ, Ж и К без отошающих присадок. Коксование навесок проводили в тиглях в муфельной печи с нагревом до 1000 °С со скоростью 7°С/мин и последующей изотермической выдержкой в течение 1 часа. Марочный и гранулометрический состав восьми исследованных шихт, вариация которых позволила выявить влияние отдельных компонентов, приведен в таблице 4.

Таблица 4
Состав модельных угольных шихт, %

Марка угля	Класс, мм	Состав шихты							
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
ГЖ	≤ 0,5	19,19	23,63	29,54	6,88	10,35	34,07	19,60	0
	0,5–3	0	0	0	17,35	0	0	23,41	0
	3–10	0	0	0	0	20,92	19,91	14,15	30,53
Ж	≤ 0,5	0	18,47	36,96	30,47	22,18	0	8,45	0
	0,5–3	16,50	19,48	0	0	0	0	0	0
	3–10	27,65	0	0	0	12,02	24,32	0	34,01
К	≤ 0,5	16,55	10,77	7,73	12,50	21,31	21,70	18,00	35,46
	0,5–3	0	27,65	0	10,26	0	0	0	0
	3–10	20,11	0	25,77	22,54	13,22	0	16,39	0

Технологические показатели полученных коксов (выходы и индексы сбрасывания) представлены в таблице 5. Для части образцов

(шихты №№1, 2, 3, 5, 7) применяли режим охлаждения с печью до 650°C с последующей выгрузкой и остыванием на воздухе. Шихты №4, №6 и № 8 охлаждались вместе с печью до комнатной температуры.

Таблица 5

Свойства полученных коксов

№ шихты	B_k , %	B_k^C , %	S_{10} , %	S_{25} , %
1	75,7	74,9	92,2	92,2
2	74,5	70,1	96,2	96,2
3	74,5	72,2	86,8	86,8
4	76,5	76,2	98,3	82,4
5	75,0	75,4	98,5	24,7
6	73,2	73,2	99,4	99,4
7	75,7	74,8	97,8	97,8
8	76,1	75,6	94,7	38,1

Наибольший общий выход кокса (B_k) отмечен для шихт № 1, 4 и 8 (от 75,7 до 76,5%), что коррелирует с повышенным содержанием в них крупных фракций (3-10 мм) углей марок Ж и К, демонстрирующих высокий выход при индивидуальном коксовании. Максимальный выход спекшегося кокса (B_k^C) также зафиксирован для этих же шихт.

Наибольшую прочность, характеризующуюся значениями индексов S_{10} и S_{25} на уровне 99,4%, показал кокс из шихты №6. Важно отметить, что данный кокс сохранял высокую прочность ($S_{10} \approx S_{25} \approx 99\%$) даже после многократного цикла испытаний на сбрасывание. Этот образец отличался максимальной, среди всех шихт, долей мелкого класса ($\leq 0,5$ мм) угля марки ГЖ (34,07%). Минимальная прочность по индексу S_{25} (24,7%) зафиксирована у кокса из шихты №5. Для большинства шихт (№ 1, 2, 3, 6, 7) значения индексов S_{10} и S_{25} были равны, что указывает на равномерный характер разрушения кокса.

Выводы

1. Экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования классов ($\leq 0,2$ мм и $\leq 0,5$ мм) углей марок ГЖ, Ж и К, Кузнецкого бассейна в составе коксовой шихты, так как они образуют спекшийся кокс.

2. Установлено, что влияние гранулометрического состава на прочность кокса имеет марочную специфику: для угля ГЖ максимальная прочность достигается при использовании класса $\leq 0,5$ мм, а для угля Ж прочность растет с увеличением размера частиц.

3. Определен оптимальный марочно-гранулометрический состав шихты, обеспечивающий получение высокопрочного кокса: уголь марки ГЖ 34,07% (класс $\leq 0,5$ мм) и 19,91 (класс 3-10 мм), уголь марки

Ж 24,30% (класс 3-10 мм), уголь марки К 21,70% (класс $\leq 0,5$ мм). Данная шихта позволяет получить кокс с рекордным значением индекса сбрасывания $S_{25}=99,4\%$.

4. Показано, что повышенная температура коксования (до 1120°C) снижает выход кокса, а ее влияние на прочность противоположно для углей ГЖ (прочность растет) и Ж (прочность падает), что связано с разной склонностью к вспучиванию.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН» проект № 124041100047-4.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных им конкурирующих интересов, которые могли бы повлиять на работу, представленную в настоящей статье.

Список литературы

1. Камнева А. И. Химия горючих ископаемых. Москва: Химия, 1974. 271 с.
2. Вегман Е. Ф., Жеребин Б. Н., Похвиснев А. Н. и др. Металлургия чугуна: Учебник для вузов / под ред. Ю. С. Юсфина. 3-е издание, переработанное и дополненное. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 с.
3. Станкевич А.С., Смелянский А.З., Беркутов Н.А., и др. Рациональное распределение углей и состава шихт для коксования // Кокс и химия. 2003. № 9. С. 16-21.
4. Беляев Е.В., Лазовский И.М., Грязнов Н.С., Фомин А.П. Эффективность подготовки углей перед коксованием способом пневматической сепарации. сборник: Подготовка и коксование углей, Свердловск. 1969. VIII. С. 98-107.
5. Пат. Р.Ф. 2550874. Способ подготовки угольной шихты для коксования. Гилязетдинов Р. Р., Сухов И. Ю; заявлено 27.11.2013, опубл. 27.11.2013; Бюл. № 33.
6. Карунова Е. В., Калько О. А., Сорокина И. В. Исследование влияния гранулометрического состава угольной шихты для коксования на Качественные характеристики получаемого кокса // Кокс и химия. 2025. № 2. С. 12-16.
7. Горанский П.Ю., Буланый С.М., Черкасов И.И., Дедушева В.И., Яценко Ю.А., Мирошниченко Д.В., Давидзон А.Р. Подготовка угольной шихты при производстве высококачественного кокса в условиях ЧАО «Макеевкокс» // Углехимический журнал. 2012. № 5-6. С. 20-26.
8. Манзор, Д. Э., Грузман В. М. Оптимизация угольной шихты для коксования // Кокс и химия. 2016. № 10. С. 8-10.
9. Кривонос В.В., Данилов А.Б., Вердибоженко Г.С., Лозинский О.Б., Дроздник И.Д., Кафтан Ю.С., Бидоленко Н.Б., Сороктяга К.Н. Оптимизация схемы подготовки и уровня измельчения групп углей и

- шихты в углеподготовительном цехе № 1 ПАО «Алчевсккокс»// Углекимический журнал. 2013. № 1-2. С. 15-22.
10. Давидзон А.Р., Дроздник И.Д. Технологические возможности улучшения качества кокса // Кокс и химия.-2006.- 8.-15-18.
 11. Ильяшов М.А., Давидзон А.Р., Коломийчинко А.И., Василенко С.Г., Дроздник И.Д., Кафтан Ю.С., Бидоленко Н.Б. Использование углей шахтоуправления «Покровское» в качестве основного компонента сырьевой базы коксования ЧАО «Макеевкокс» // Углекимический журнал. 2012. № 5-6. С. 27-34.
 12. Степанов Ю.В., Попова Н.К., Махортова Л.А. Теория и практика шихтовки в современных условиях // Кокс и химия. 2005. №7. С. 6-10.

Об авторах:

КОВАЛЕВ Родион Юрьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углекими Сибирского отделения Российской академии наук» (650000, Россия, Кемеровская область, г. Кемерово, пр-т Советский, д. 18). e-mail: kovaleviuhm@yandex.ru. ORCID: 0009-0001-7776-7440, SPIN-код: 8244-8479, РИНЦ AuthorID: 802341.

НИКИТИН Андрей Павлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углекими Сибирского отделения Российской академии наук» (650000, Россия, Кемеровская область, г. Кемерово, пр-т Советский, д. 18). e-mail: nikitinandreyp@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-2187-2281, SPIN-код: 2980-7637, РИНЦ AuthorID: 113850.

Influence of granulometric and grade composition of Kuzbass coals on coke yield and strength characteristics

R.Yu. Kovalev, A.P. Nikitin

The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, Kemerovo

This paper presents the results of model experiments on the coking of individual coal grades (D, DG, G, GZh, Zh, K) from the Kuznetsk Basin and charges formulated from them. The influence of the degree of metamorphism, granulometric composition (size classes: <0.2 mm, <0.5 mm, 0.5-3 mm, 3-10 mm), and grade composition of the charge on coke yield and its strength characteristics, assessed by the shatter indices S_{10} and S_{25} , was investigated. It was found that GZh, Zh, and K grade coals with particle sizes ≤ 0.5 mm are suitable for use in the charge, forming sintered coke. It was shown that separating the <0.5 mm fraction for Zh grade coal increases coke strength, while maximum strength is observed for coke from GZh grade coal (≤ 0.5 mm fraction). The optimal charge composition (GZh: 53.98%, Zh: 24.32%, K: 21.70%) was determined, ensuring the production of high-strength coke with a shatter index of $S_{25}=99.4\%$.

Keywords: coal, coking, coke, charge, coke yield, granulometric composition, shatter index, coke strength.

Дата поступления в редакцию: 12.01.2026.

Дата принятия в печать: 19.01.2026.