

ВЛИЯНИЕ МАРОЧНОГО СОСТАВА УГЛЕЙ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Ю.Ф. Патраков¹, С.А. Семенова¹, А.В. Яркова¹

¹ Федеральный исследовательский центр Угля и углехимии Сибирского отделения РАН,
Институт угля, Кемерово, Россия, e-mail: yupat52@gmail.com

Аннотация: Проведено исследование взаимного влияния качественных характеристик углей разных стадий метаморфизма на технологические свойства получаемых на их основе трехкомпонентных энергетических смесей. Особое внимание уделяется выбору и обоснованию аддитивных параметров качества углей для прогнозирования топливных смесей с заданными теплотехническими свойствами. Во введении описаны проблемы, с которыми сталкиваются энергетики при формировании многокомпонентных топливных смесей; отражены аспекты, связанные с трудностями прогнозирования состава угольных смесей. В качестве методов исследования использованы стандартные методы оценки качества углей: технический анализ (влажность, зольность, выход летучих веществ), определение теплоты сгорания углей, петрографический анализ, анализ химического состава золы. Показано, что различия марочного состава, степени метаморфизма, петрографических и минералогических особенностей углей оказывают существенное влияние на свойства получаемых на их основе топливных смесей. Установлено, что такие параметры, как влагосодержание, зольность, выход летучих веществ, теплота сгорания и химический состав золы, можно считать аддитивными и использовать их для расчета состава топливных смесей по заданным критериям качества топлива. Петрографические параметры – содержание спекающих и отошающих компонентов, а также показатель отражения витринита – не являются аддитивными.

Ключевые слова: каменный уголь, угольные энергетические смеси, стадия метаморфизма, петрографический состав, химический состав золы, аддитивные параметры.

Благодарность: Исследование выполнено за счет грантов РНФ (соглашение № 25-17-20003 от 14.05.2025 г.) и Кемеровской области – Кузбасса (соглашение № 03/2025 от 10.04.2025 г.).

Для цитирования: Патраков Ю. Ф., Семенова С. А., Яркова А. В. Влияние марочного состава углей на технические характеристики энергетических угольных смесей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 9. – С. 103–114. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_103.

Influence of coal grade composition on handling abilities of steam coal blends

Yu.F. Patrakov¹, S.A. Semenova¹, A.V. Yarkova¹

¹ Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of coal), Kemerovo, Russia, e-mail: yupat52@gmail.com

Abstract: The study focuses on mutual effect of qualities of different rank coals on handling abilities of three-component thermal coal blends. Emphasis is on selection and justification of the additive qualities of coals for forecasting thermal characteristics of fuel blends. The foreword part describes the problems that power engineers are faced with when composing multi-component fuel blends, and discusses the complexities of forecasting compositions of coal blends. The research methods were the standard techniques involved in the coal quality evaluation: technical analysis (moisture content, ash content, volatile yield), determination of combustion value, petrographic analysis, and chemical composition analysis of ash. It is shown that differences in grade composition, rank, and in petrographic and mineralogical features of coals have a great influence on the resultant fuel blends. It is found that such parameters as moisture content, ash content, volatile yield, combustion heat and chemical composition of ash can be assumed as the additive parameters to be used in the fuel blend design by the preset criteria of fuel quality. The petrographic parameters, namely, contents of coking and leaning macerals, as well as vitrinite reflectance, are not the additive parameters.

Key words: bituminous coal, thermal coal blends, coal rank, petrographic composition, chemical composition of ash, additive parameters.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant Agreement No. 25-17-20003 as of May 14, 2025, and by the Kemerovo Region–Kuzbass, Grant Agreement No. 03/2025 as of April 10, 2025.

For citation: Patrakov Yu. F., Semenova S. A., Yarkova A. V. Influence of coal grade composition on handling abilities of steam coal blends. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(9):103-114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_103.

Введение

Использование на тепловых электростанциях (ТЭС) непроектных угольных смесей с неизвестными свойствами может привести к ухудшению технологических режимов сжигания, в т. ч. шлакованию поверхностей нагрева, неоднородному выгоранию топлива, выбросам сажи и т.д. [1 – 3]. Поэтому выбор оптимальной топливной смеси требует знаний о характеристиках и свойствах смешиваемых углей и закономерностях их поведения в составе смеси.

На сегодняшний день в России практически не ведется сбор и систематизация данных по подготовке эффективных энергетических топлив на основе смесей рядовых углей. Большинство угольных электростанций формируют смеси для сжигания, руководствуясь исключительно собственным практическим опытом,

без применения научно обоснованных моделей смешивания. Научные публикации по данной теме практически отсутствуют, что связано с недостаточным интересом со стороны коммерческих организаций, производящих топливные смеси. Желание снизить затраты за счет максимального использования низкокачественного угля и минимизации доли высококачественного топлива приводит к несоблюдению технологических норм эксплуатации энергетических установок, снижению их эффективности и возникновению экологических проблем.

Прогнозирование поведения многокомпонентных угольных смесей при совместном сжигании затруднено по нескольким причинам:

- характеристики смеси не всегда соответствуют средневзвешенным показателям отдельных углей; смешиваемые

компоненты могут проявлять синергические или антагонистические эффекты, что нарушает принципы простого сложения свойств;

- многочисленные переменные — состав смеси, степень метаморфизма углей, различие в реакционной способности и химическом составе делают прогнозирование сложного многокомпонентного продукта крайне затруднительным;

- между компонентами могут возникать химические и физические взаимодействия, непредсказуемо влияющие на горение, выделение тепла и общее поведение смеси;

- до сих пор не разработаны надежные универсальные подходы, позволяющие точно прогнозировать поведение любых многокомпонентных смесей, особенно если речь идет о большом количестве марок углей.

Для прогнозирования поведения угольных смесей в рамках мирового опыта используются как простые таблицы электронных данных типа Excel, так и сложные системы компьютерного моделирования [4–8]. Среди существующих моделей смешивания углей (эмпирические, аддитивные, термодинамические, кинетические и др.) наибольшую популярность получили аддитивные модели, основанные на принципе, что свойства смеси являются средневзвешенными значениями отдельных компонентов, что делает их простыми в расчетах и понятными для инженеров-практиков [9]. Однако несмотря на успехи в изучении бинарных и тройных смесей, точное предсказание характеристик сложных многокомпонентных композиций остается сложной задачей, требующей дальнейшей фундаментальной и экспериментальной проработки.

Экономический эффект от использования многокомпонентных топливных смесей может проявляться в нескольких направлениях [1]:

- оптимизация затрат на топливо — добавка низкосольных и низкосернистых углей в смеси с более дешевыми, но менее качественными углями, а также использование высокосольных углеотходов, прошедших стадию дообогащения [10], позволяет достигать необходимых характеристик топлива при снижении общих затрат;

- гибкость в закупках углей разных месторождений и оптимизация маршрутов поставок способствует снижению транспортных расходов;

- повышение эффективности сжигания топлива путем регулирования скорости воспламенения, полноты сгорания и количества выделяемого тепла, а также параметров шлакования в результате грамотного подбора компонентов угольной смеси;

- уменьшение рисков экологических санкций за счет сокращения выбросов CO_2 , SO_2 , NO_x .

Достижение экономического эффекта от использования многокомпонентных угольных смесей возможно благодаря глубокому пониманию физико-химических и технологических свойств углей, механизмов взаимодействия компонентов смеси в условиях сжигания, а также обновлению и усовершенствованию существующих моделей формирования топливных смесей.

Цель работы — исследование взаимного влияния углей разных стадий метаморфизма и петрографического состава на технологические свойства сформированных на их основе топливно-энергетических смесей.

Материалы и методы

В качестве исходных компонентов смеси использованы специально отобранные на угледобывающих предприятиях Кузнецкого бассейна малосольные угли разных стадий метаморфизма марок Д — длиннопламенный, СС — сла-

боспекающий и Т — тощий с классификацией по крупности согласно ГОСТ 19242-73, плитный с размером кусков 100—200 мм. Принцип отбора низкозольных проб углей обусловлен потребностью минимизировать вклад привнесенной минеральной части (вторичной золы) и оценить вклад материнской золы.

Угольные пробы (по 5 кг каждая) измельчались на лабораторной мельнице, рассеивались по крупности и смешивались в определенных соотношениях с получением четырех модельных смесей с соотношением для каждого угля 1:1:1 (Д1СС1Т1); 1:1:2 (Д1СС1Т2); 1:2:1 (Д1СС2Т1); 2:1:1 (Д2СС1Т1) (масс.).

Все исходные угли и полученные на их основе смеси охарактеризованы с использованием стандартных методов анализа, включающих определение влаги W^a , зольности A^d , выхода летучих веществ V^{daf} , теплоты сгорания Q и петрографического состава.

Определение теплоты сгорания аналитической пробы угля проводили на калориметре С2000 IKA.

Петрографический анализ проводили с использованием автоматизированного комплекса оценки марочного состава

Таблица 1

Технологическая характеристика образцов углей и смесей на их основе
Technological characteristics of coal samples and their blends

№ п/п	Код пробы	Технический анализ, %			Теплота сгорания			
		влаж-ность W^a	золь-ность A^d	выход летучих веществ V^{daf}	высшая		низшая	
					Q_s^{daf} (ккал/кг)	Q_s^{daf} (МДж/кг)	Q_i^r (ккал/кг)	Q_i^r (МДж/кг)
1	Д	9,8	4,0	40,1	7188	30,07	6611	27,68
2	СС	2,8	3,2	19,3	8380	35,09	8087	33,86
3	Т	1,6	5,8	9,9	8230	34,43	7761	32,50
4	Д1СС1Т1	4,5/4,7*	4,4/4,3	22,5/22,9	7945	33,26	7526/7486	31,51
5	Д1СС1Т2	3,8/3,9	4,9/4,7	19,4/19,7	8 077	33,81	7620/7555	31,90
6	Д1СС2Т1	4,0/4,2	4,2/4,1	21,3/21,9	8 095	33,89	7689/7636	32,19
7	Д2СС1Т1	5,9/6,0	4,5/4,3	26,9/27,2	7763	32,50	7330/7267	30,69

Примечание: левое значение в таблице — измеренный результат, правое — расчетный.

ва углей системы «SIAMS-620» (Россия) в среде масляной иммерсии.

Химический состав золы определяли с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой Avio 500 (Perkin-Elmer, Германия).

Результаты

Характеристики исходных углей и смесей на их основе приведены в табл. 1.

Результаты технического анализа угольных смесей (№ п/п 4-7) удовлетворительно соответствуют расчетному среднему значению конкретного параметра (см. табл. 1). На рис. 1 приведены зависимости некоторых теплоэнергетических параметров — влагосодержания W^a , зольности A^d и рабочей теплоты сгорания Q_i^r — от выхода летучих веществ V^{daf} (параметра, определяющего степень метаморфизма углей) для исследуемых углей и смесей. Параметр влагосодержание W^a уменьшается в соответствии с выходом летучих веществ V^{daf} и имеет прямолинейную зависимость (рис. 1, а), что указывает на его аддитивность.

Параметр зольность A^d не зависит от стадии метаморфизма углей (рис. 1, б), поскольку определяется генетическими

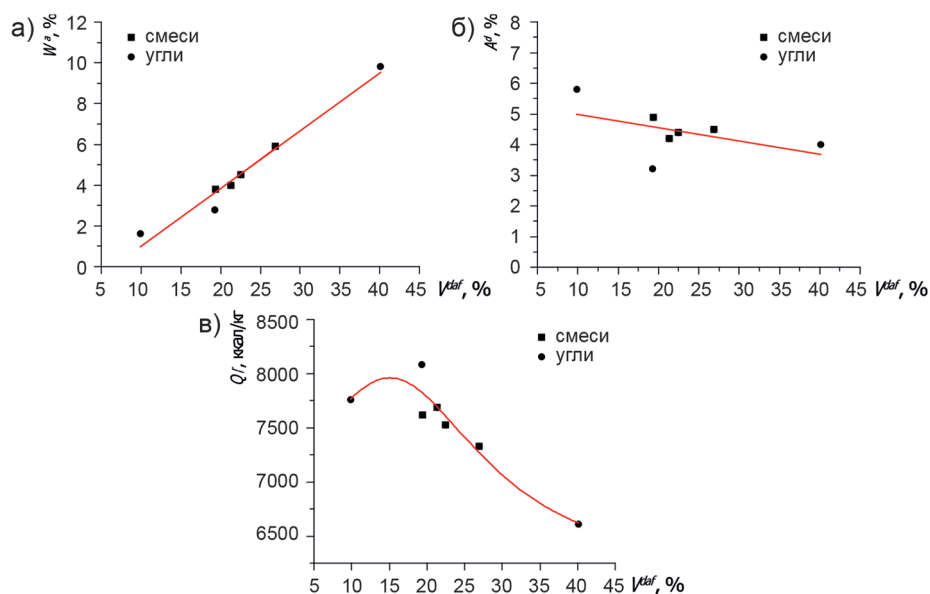


Рис. 1. Зависимость параметров влагосодержания W^a (а), зольности A^d (б) и рабочей теплоты сгорания Q_i^v (в) углей и угольных смесей от выхода летучих веществ V^{daf}

Fig. 1. Dependence of moisture content W^a (a), ash content A^d (b) and working calorific value Q_i^v (v) of coals and coal mixtures on volatile matter yield V^{daf}

особенностями органического материала, геологическими условиями осадконакопления, а также способом добычи и первичной переработки углей [11]. Вместе с тем значения данного параметра для исследуемых угольных смесей соответствуют расчетным средним зна-

Таблица 2

Результаты петрографического анализа углей и смесей на их основе

Results of petrographic analysis of coals and their blends

Код пробы	Витринит V_t , %	Семи- витринит S_v , %	Инертинит I , %	Сумма ото- щающих компонентов ΣOK , %	Показатель отражения витринита R_o , %	Стандартное отклонение σ_R , %
Д	83	2	15	16	0,563	0,031
СС	40	17	43	54	1,267	0,087
Т	30	12	58	66	1,835	0,149
Д1СС1Т1	46/51*	8	46	51/45	0,762/1,221	0,408
Д1СС1Т2	40/46	5	55	58/51	0,762/1,375	0,443
Д1СС2Т1	44/48	10	46	53/48	0,825/1,233	0,359
Д2СС1Т1	60/59	8	32	37/38	0,758/1,057	0,429

Примечание: левое значение в таблице — измеренный результат, правое — расчетный.

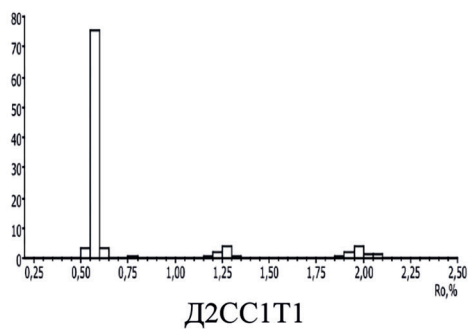
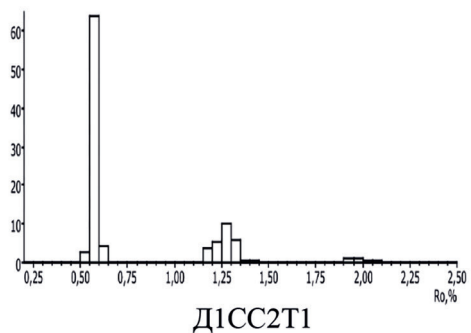
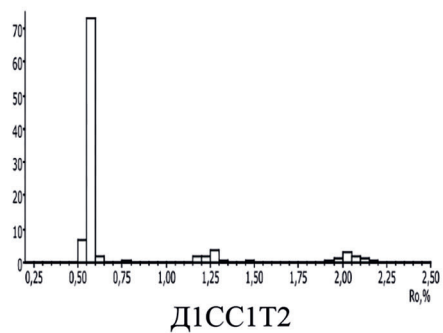
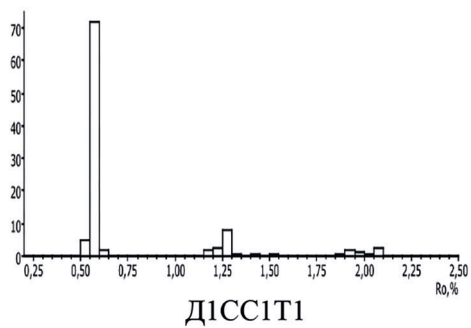
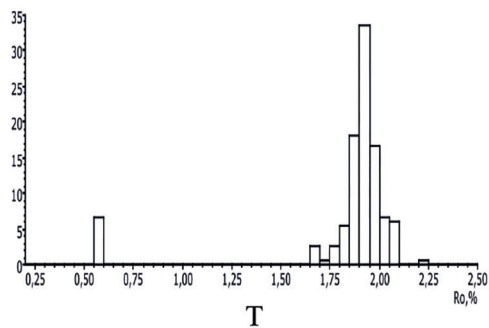
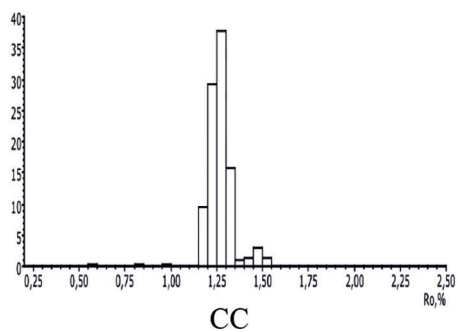
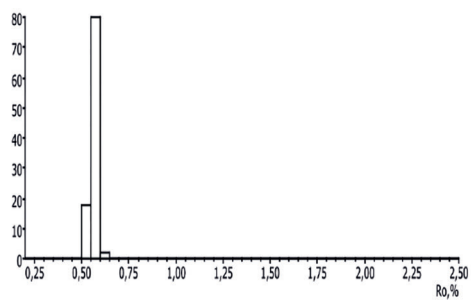


Рис. 2. Рефлектограммы отражения витринита для исходных компонентов и угольных смесей на их основе

Fig. 2. Reflectograms of vitrinite reflection for raw components and coal blends

Параметр теплота сгорания Q_i^r для исходных угольных проб марок Д, СС и Т имеет классическую гауссианоподобную зависимость с максимумом в области средней стадии метаморфизма (уголь СС) (рис. 1, в) [11]. С учетом распределения на кривой аппроксимации точек, соответствующих угольным смесям, можно констатировать, что параметр Q_i^r является аддитивным. Таким образом, параметры влагосодержание W^a , зольность A^d , выход летучих веществ V^{daf} и теплота сгорания Q_i^r можно считать аддитивными для расчета состава топливных смесей по заданным критериям качества топлива.

Результаты петрографического анализа углей и смесей на их основе приведены в табл. 2.

Анализ результатов петрографического анализа (см. табл. 2) показывает, что использование показателей, соответствующих содержанию отдельных микрокомпонентов и их суммы (Vt , ΣOK), а также показателя отражения витринита R_o в качестве расчетных для составления энергетических смесей некорректно, поскольку измеряемое при определении R_o количество витринита не прямо пропорционально его общему содержанию в углях разного петрографического состава. По рефлектограмме

невозможно четко разделить изометаморфные угли разных марок. Расчетные значения петрографических параметров не совпадают с измеренными, что указывает на их неаддитивность.

Рефлектограммы отражения витринита приведены на рис. 2.

Несмотря на неаддитивность петрографических параметров (см. табл. 1), наличие на рефлектограмме отражения витринита (см. рис. 2) пиков, соответствующих диапазону R_o конкретных углей ($R_o = 0,5 - 0,7\%$ – уголь марки Д, $1,1 - 1,7\%$ – СС, $1,7 - 2,4\%$ – Т), можно использовать для качественной оценки присутствия отдельных марок углей и их идентификации в составе угольной смеси по аналогии с определением марочного состава шихт коксования [12–14].

Поскольку химический состав золы углей оказывает существенное влияние на надежность и производительность энергоустановок, на его основе предложено множество расчетных параметров, позволяющих оценить поведение золы в процессе горения, взаимодействие с оборудованием и влияние на окружающую среду. Среди них индексы плавления золы, кислотно-основные характеристики [15–17], оценка абразивности и эрозионной активности [18,

Таблица 3

Химический состав золы углей и смесей на их основе

Chemical composition of coal ash and its blends

Код пробы	Химический состав золы, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO ₂	SO ₃
Д	56,0	18,6	6,6	8,5	1,6	0,2	0,5	0,9	1,7	0,02	4,4
СС	60,6	24,8	8,1	2,1	1,2	0,4	1,4	0,8	0,3	—	0,4
Т	71,4	17,5	1,8	2,4	1,0	0,7	2,9	0,2	0,9	0,04	1,0
Д1СС1Т1	62,4	20,6	5,4	4,4	1,3	0,4	0,9	0,6	1,0	0,02	1,9
Д1СС1Т2	64,6	19,8	4,7	3,7	1,2	0,5	1,9	0,5	1,0	0,02	2,0
Д1СС2Т1	62,5	21,1	6,0	4,0	1,2	0,4	1,6	0,7	0,8	0,02	1,6
Д2СС1Т1	61,3	19,6	5,9	5,3	1,3	0,4	1,3	0,7	1,2	0,02	2,6

19], показатели токсичности и экологической опасности [20, 21].

Для образцов углей Д, СС и Т и смесей на их основе экспериментально был определен оксидный состав золы. Поскольку зольность углей является аддитивным параметром для составления угольных смесей [1, 4], то оксидный состав золы угольных смесей также был рассчитан исходя из пропорционального долевого участия углей в формируемой смеси. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями не превышали ошибку определения $\pm 2 - 3\%$ отн.

Результаты химического состава золы углей и угольных смесей на их основе приведены в табл. 3.

Температуру размягчения золы T_b и температуру начала жидкоплавкого состояния T_c определяли расчетным способом согласно работе [15]:

$$T_b = 1094 + 42,5 K_{пл};$$

$$T_c = 1139 + 48,6 K_{пл},$$

где $K_{пл}$ — коэффициент соотношения кислотных и основных оксидов:

$$K_{пл} = (SiO_2 + Al_2O_3) / (CaO + MgO + Fe_2O_3).$$

Коэффициент вязкости шлака K_b и температуру нормального шлакоудаления $T_{нш}$ рассчитывали по аналогии с работой [15]:

$$K_b = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO + MgO),$$

$$T_{нш} = 1085 + 314 \cdot K_b.$$

Расчетные показатели плавкости золы приведены в табл. 4.

Из данных табл. 3, 4 следует, что наиболее легкоплавкой среди исследуемых углей является зола угля марки Д, температура начала шлакования которого составила 1284 °С, что соответствует средней склонности к шлакованию. Такие золы образуют относительно мягкие, легкоудаляемые шлаковые покровы. Для углей марок СС и Т температуры начала шлакования составили 1412 и 1820 °С соответственно, на основании чего их золы можно отнести к низкой склонности к шлакованию, имеющей минимальное влияние на эксплуатационные характеристики оборудования. Расчетные температуры шлакоудаления составили 1584, 1609 и 2071 °С для углей марок Д, СС и Т соответственно. Повышенные температуры плавления золы у более метаморфизованных углей

Таблица 4

Показатели плавкости золы углей и смесей на их основе

Indices of ash fusion for coals and their blends

Теплотехнические показатели	Д	СС	Т	Д1СС1Т1	Д1СС1Т2	Д1СС2Т1	Д2СС1Т1
Коэффициент плавления золы $K_{пл}$	4,47	7,49	17,09	7,48	8,82	7,46	6,47
Коэффициент вязкости шлака K_b	1,59	1,67	3,14	1,20	2,22	1,91	1,88
Температуры размягчения золы T_b , °С	1284	1412	1820	1412	1469	1411	1369
Температура жидкоплавкого состояния T_c , °С	1356	1503	1970	1503	1568	1502	1453
Температура нормального шлакоудаления $T_{нш}$, °С	1584	1609	2071	1782	1782	1685	1675

СС и Т обеспечивает преобладающая доля в ней высокоплавких оксидов кремния и алюминия. Напротив, превышение доли оксидов железа, кальция и фосфора в золе низкометаморфизованного угля Д способствует понижению ее температуры плавления относительно других исследуемых компонентов топливной смеси (см. табл. 3) [1, 14].

Все варианты исследованных трехкомпонентных смесей имеют расчетную температуру начала плавления $T_{\text{в}} > 1400^\circ\text{C}$, что указывает на их низкую склонность к шлакованию. Исключение составляет смесь Д2СС1Т1, в которой повышена доля угля со средней плавкостью золы (см. табл. 4).

Таким образом, добавка в угольную смесь угля с наименьшей температурой плавления золы способствует понижению температуры плавления золы угольной смеси. Температура шлакоудаления для всех вариантов угольных смесей составляет $1675 - 1782^\circ\text{C}$.

Температура плавления золы исследуемых угольных смесей превышает 1400°C , что свидетельствует о низком риске образования жидких шлаковых отложений при стандартных режимах сжигания угля, которые соответствуют $1300 - 1400^\circ\text{C}$.

Зола остается в твердом состоянии при рабочем режиме котла и практически не формирует шлаков; уменьшается количество выбросов вредных веществ в атмосферу; снижается вероятность коррозии и эрозии теплообменных поверхностей, что продлевает срок службы аппаратов [1, 2, 19, 22].

Заключение

В рамках данной работы проведен анализ взаимного влияния углей разных стадий метаморфизма и петрографического состава на технологические свойства сформированных на их основе энергетических смесей. Показано, что параметры влагосодержание W^a , зольность A^d , выход летучих веществ V^{daf} , теплота сгорания Q_i^r и химический состав золы можно считать аддитивными, в то время как петрографические параметры — содержание спекающих Vt и отошающих ΣOK компонентов, показатель отражения витринита R_o , таковыми не являются. Формирование трехкомпонентных топливных смесей из углей разных стадий метаморфизма с различными показателями плавкости золы способствует получению гомогенных смесей с усредненными теплотехническими свойствами. Показано, что различия степени химической зрелости (метаморфизма) и, как следствие, физико-химических свойств исследуемых углей оказывают существенное влияние на свойства получаемых на их основе топливных смесей. Поэтому знания о генетических, физико-химических и технологических свойствах исходных составляющих многокомпонентных угольных смесей необходимы для регулирования свойств топливной смеси, создания смесей с желаемыми характеристиками горения (скорость воспламенения, полнота сгорания, количество выделяемого тепла, степень шлакования), а также достижения необходимых параметров горения, производительности и экономии топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехнович А. Н. Характеристики и свойства энергетических углей. — Челябинск: Цицеро, 2012. — 549 с.
2. Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов / Под ред. А. М. Клера, Э. А. Тюриной. — Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. — 298 с.
3. Коваль Т. В., Кудряшов А. Н. Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на тепловой электроцентраль ПАО «Иркутскэнерго» // Вестник Иркутского государствен-

ного технического университета. — 2020. — Т. 24. — № 3. — С. 639–648. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-3-639-648.

4. *Xi-j G., Ming Ch., Jia-wei W.* Coal blending optimization of coal preparation production process based on improved GA // *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009, vol. 1, article 654. DOI: 10.1016/j.proeps.2009.09.103.

5. *Yin Q., Xiong Z., Zhang Q., Hu Ji.* Structure optimization of coal blending equipment in coking // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 423, no. 1, article 012091. DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012091.

6. *Азев В. А., Попов Д. В.* Управление качеством товарной продукции в условиях отработки сложноструктурного угольного месторождения // *Горные науки и технологии*. — 2020. — № 5(20). — С. 119–130. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-119-130.

7. *Li L., Zhou L., Ren Q., Cui R., Yang S., Li W., Dong S.* Influence of ash composition on slag properties and network structure in coal gasification fine slag: A high-temperature melting perspective // *Energy*. 2025, vol. 329, article 136816. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136816.

8. *Liu B., Peng D., Chen S.* Constraint-aware coal blending optimization for coal-fired power plants using random forest and coati optimization // *Applied Sciences*. 2026, vol. 16, article 4582. DOI: 10.3390/app16104582.

9. *Патраков Ю. Ф., Семенова С. А., Яркова А. В.* Обоснование выбора оптимальных технологических параметров для формирования энергетических угольных смесей // *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. — 2025. — № 11. — С. 31–37.

10. *Патраков Ю. Ф., Семенова С. А., Степаненко А. А., Клейн М. С., Вахонина Т. Е.* Сочетание методов сухого и мокрого обогащения для повышения качества угольных отсеков // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2025. — № 6. — С. 156–168. DOI: 10.15372/FTPRPI20250616.

11. *van Krevelen D. W.* Coal: typology, physics, chemistry, constitution. Amsterdam, New York: Elsevier, 1993, 979 p.

12. *Станкевич А. С., Станкевич В. С.* Определение технологической ценности углей, используемых для производства кокса // *Кокс и химия*. — 2011. — № 67. — С. 2–10.

13. *Заостровский А. Н., Исмагилов З. Р.* Рефлектограммный анализ углей и шихт Кузнецкого бассейна // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. — 2021. — № 3. — С. 48–57. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-3-48-57.

14. *Еремин И. В., Арцер А. С., Броневец Т. М.* Петрология и химико-технологические параметры углей Кузбасса. — Кемерово: Притомское изд-во, 2000. — 399 с.

15. *Шпирт М. Я., Артемьев В. Б., Силютин С. А.* Использование твердых отходов добычи и переработки углей. — М.: Горное дело, ООО «Киммерийский центр», 2013. — 432 с.

16. *Алехнович А. Н.* Экспертная оценка и прогнозирование шлакующих свойств углей // *Электрические станции*. — 2015. — № 8. — С. 7–17.

17. *David A. B., Brian F. T., Maohong F.* Coal gasification and its application. Oxford: Elsevier, 2011, 399 p. DOI: 10.1016/C2009-0-20067-5.

18. *Алехнович А. Н., Артемьева Н. В., Богомолов В. В.* Определение и оценка абразивности углей // *Электрические станции*. — 2020. — № 8. — С. 16–23. DOI: 10.34831/EP.2020.1069.8.004.

19. *Герасимова Н. П.* Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. — 2020. — Т. 24. — № 3. — С. 596–605. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-3-596-605.

20. *Гущина Т. О., Соколовская Е. Е., Эпштейн С. А., Фоменко Н. А.* Отходы добычи и переработки углей. Методические подходы к оценке их экологической безопасности и направлений использования. Часть 4. Критерии оценки рисков дренажа кислых стоков при складировании и использовании отходов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 4. — С. 69–84. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_69.

21. *Chen Y., Fan Y., Huang Y., Liao X., Xu W., Zhang T.* A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024, vol. 269, article 115905. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115905.

22. *Seraya N., Litvinov V., Daumova G., Shaikhov M., Ramazanov R., Aubakirova R.* Features of ash and slag formation during incomplete combustion of coal from the Karazhyra deposit in small- and medium-scale power plants // *Processes*. 2025, vol. 13, no. 8, article 2467. DOI: 10.3390/pr13082467. **ГЛАВ**

REFERENCES

1. Alekhnovich A. N. *Kharakteristiki i svoystva energeticheskikh ugley* [Characteristics and properties of energy coals], Chelyabinsk, Tsitsero, 2012, 549 p.
2. *Optimizatsionnye issledovaniya energeticheskikh ustanovok i kompleksov*. Pod red. A. M. Klera, E. A. Tyurinoy [Optimization studies of power plants and energy complexes, Kler A. M., Tyurina E. A. (Eds.)], Novosibirsk, 2016, 298 p.
3. Koval' T. V., Kudryashov A. N. Assessment of slagging and polluting properties of coals burned at the Irkutskenergo cogeneration plant, JSC. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020, vol. 24, no. 3, pp. 639–648. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-3-639-648.
4. Xi-j G., Ming Ch., Jia-wei W. Coal blending optimization of coal preparation production process based on improved GA. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009, vol. 1, article 654. DOI: 10.1016/j.proeps.2009.09.103.
5. Yin Q., Xiong Z., Zhang Q., Hu Ji. Structure optimization of coal blending equipment in coking. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 423, no. 1, article 012091. DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012091.
6. Azev V. A., Popov D. V. Marketable product quality management in conditions of coal mining at a deposit of complicated structure. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020, no. 5(20), pp. 119–130. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-119-130.
7. Li L., Zhou L., Ren Q., Cui R., Yang S., Li W., Dong S. Influence of ash composition on slag properties and network structure in coal gasification fine slag: A high-temperature melting perspective. *Energy*. 2025, vol. 329, article 136816. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136816.
8. Liu B., Peng D., Chen S. Constraint-aware coal blending optimization for coal-fired power plants using random forest and coati optimization. *Applied Sciences*. 2026, vol. 16, article 4582. DOI: 10.3390/app16104582.
9. Patrakov Yu. F., Semenova S. A., Yarkova A. V. Justification of the choice of optimal technological parameters for the formation of energy coal mixtures. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2025, no. 11, pp. 31–37. [In Russ].
10. Patrakov Yu. F., Semenova S. A., Stepanenko A. A., Klein M. S., Vakhonina T. E. Combining dry and wet separation methods toward improved quality of coal siftings. *Journal of Mining Sciences*. 2025, no. 6, pp. 156–168. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20250616.
11. van Krevelen D. W. *Coal: typology, physics, chemistry, constitution*. Amsterdam, New York: Elsevier, 1993, 979 p.
12. Stankevich A. S., Stankevich V. S. Determining the value of coals used for coke production. *Coke and Chemistry*. 2011, no. 67, pp. 2–10. [In Russ].
13. Zaostrovskii A. N., Ismagilov Z. R. Reflectogram analysis of coals and charges in the Kuznetsk basin. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021, no. 3, pp. 48–57. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-3-48-57.
14. Eremin I. V., Artser A. S., Bronovets T. M. *Petrologiya i khimiko-tekhnologicheskie parametry ugley Kuzbassa* [Petrology and chemical and technological parameters of Kuzbass coal], Kemerovo, 2000, 399 p.
15. Shpirt M. Ya., Artem'ev V. B., Silyutin S. A. *Ispol'zovanie tverdykh otkhodov dobychi i pererabotki ugley* [Use of solid waste from coal mining and processing], Moscow, 2013, 432 p.
16. Expert appraisal and prediction of coal slagging properties. *Elektricheskie stantsii*. 2015, no. 8, pp. 7–17. [In Russ].
17. David A. B., Brian F. T., Maohong F. *Coal gasification and its application*. Oxford, Elsevier, 2011, 399 p. DOI: 10.1016/C2009-0-20067-5.
18. Alekhnovich A. N., Artem'eva N. V., Bogomolov V. V. Definition and assessment of coals abrasiveness. *Elektricheskie stantsii*. 2020, no. 8, pp. 16–23. [In Russ]. DOI: 10.34831/EP.2020.1069.8.004.
19. Gerasimova N. P. Ash wear of boiler heating surfaces. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020, vol. 24, no. 3, pp. 596–605. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-3-596-605.
20. Gushchina T. O., Sokolovskaya E. E., Epshtein S. A., Fomenko N. A. Wastes from coal mining and processing. Methodological approaches to the assessment of their ecological safety and directions for use. Part 4. Criteria for assessing the risks of acid drainage during storage and use of wastes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 69–84. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_69.

21. Chen Y., Fan Y., Huang Y., Liao X., Xu W., Zhang T. A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024, vol. 269, article 115905. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115905.

22. Seraya N., Litvinov V., Daumova G., Shaikhov M., Ramazanova R., Aubakirova R. Features of ash and slag formation during incomplete combustion of coal from the Karazhyra deposit in small- and medium-scale power plants. *Processes*. 2025, vol. 13, no. 8, article 2467. DOI: 10.3390/pr13082467.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Патраков Юрий Федорович¹ — д-р хим. наук,
профессор, зав. лабораторией,
e-mail: yupat52@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-8087-7563,

Семенова Светлана Александровна¹ — канд. хим. наук,
доцент, ведущий научный сотрудник,
e-mail: semlight@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2048-4423,

Яркова Анастасия Владимировна¹ — ведущий инженер,
e-mail: nas.yarkova1998@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0004-1619-9541,

¹ Федеральный исследовательский центр Угля и углехимии
Сибирского отделения РАН, Институт угля.

Для контактов: Патраков Ю.Ф., e-mail: yupat52@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.F. Patrakov¹, Dr. Sci. (Chem.), Professor,
Head of Laboratory, e-mail: yupat52@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-8087-7563,

S.A. Semenova¹, Cand. Sci. (Chem.),
Assistant Professor, Leading Researcher,
e-mail: semlight@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2048-4423,

A.V. Yarkova¹, Leading Engineer,
e-mail: nas.yarkova1998@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0004-1619-9541,

¹ Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry,
Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of coal),
Kemerovo, Russia.

Corresponding author: Yu.F. Patrakov, e-mail: yupat52@gmail.com.

Получена редакцией 17.04.2026; получена после рецензии 25.05.2026; принята к печати 10.08.2026.

Received by the editors 17.04.2026; received after the review 25.05.2026; accepted for printing 10.08.2026.

