Оригинальная статья

Original Paper

УДК 504.062.2 © Ю.Ф. Патраков✉[1], С.М. Никитенко[1], А.А. Рожков[2], М.И. Олейникова[1], М.К. Королев[1], 2026

[1] Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения РАН (ФИЦ УУХ СО РАН), 650065, г. Кемерово, Россия
[2] ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, 127083, г. Москва, Россия
✉ e-mail: yupat52@gmail.com

UDC 504.062.2 © Yu.F. Patrakov✉[1], S.M. Nikitenko[1], A.A. Rozhkov[2], M.I. Oleynikova[1], M.K. Korolev[1], 2026

[1] Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation
[2] Russian Energy Agency» of the Ministry of Energy of Russia, Moscow, 127083, Russian Federation
✉ e-mail: yupat52@gmail.com

Многокомпонентное топливо на основе углеродосодержащих материалов: принципы формирования, свойства, методика оптимизации*

Multicomponent fuel based on carbon-containing materials: formation principles, properties, and optimization methods

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-8-83-89

В статье рассмотрены современные подходы к энергетическому использованию углеродосодержащих материалов (в том числе техногенного происхождения) в составе многокомпонентного угольного топлива (далее МУТ). Показано, что отходы угольной отрасли и другие органические компоненты представляют собой вторичное углеродосодержащее сырье с существенным энергетическим потенциалом, однако их прямое использование ограничено высокой влажностью, зольностью, мелкодисперсным составом и другими параметрами. Предложено направление по разработке многокомпонентных твердых топлив на основе угля с добавлением углеродосодержащих материалов с учетом физико-химических и теплотехнических свойств компонентов, технологических характеристик, определяющих поведение смеси при воспламенении, горении, эмиссии продуктов сгорания. Для улучшения воспламеняемости, повышения выхода летучих веществ и коррекции зольности в топливных смесях предложено использовать органические компоненты. Сформулирована оптимизационная задача выбора состава и долей компонентов топливной смеси и предложено ее решение методом Парето-оптимальности.

Ключевые слова: *многокомпонентное топливо, углеродосодержащий материал, физико-химические и теплотехнические свойства, оптимизация, горение.*

Для цитирования: Многокомпонентное топливо на основе углеродосодержащих материалов: принципы формирования, свойства, методика оптимизации / Ю.Ф. Патраков, С.М. Никитенко, А.А. Рожков и др. // Уголь. 2026;(8):83-89. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-8-83-89.

Abstract

Modern approaches to the energy utilization of carbon materials in multicomponent solid fuels are examined in this article. It is shown that coal industry waste and other organic components represent secondary carbon-containing raw materials with

ПАТРАКОВ Ю.Ф.
Доктор хим. наук, профессор, заведующий Лабораторией формирования топливных смесей, ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: yupat52@gmail.com

НИКИТЕНКО С.М.
Доктор экон. наук, доцент, главный научный сотрудник Лаборатории формирования топливных смесей, ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: nsm.nis@mail.ru

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

РОЖКОВ А.А.
Доктор экон. наук, профессор, начальник отдела аналитических исследований и краткосрочного прогнозирования развития угольной промышленности ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, 127083, г. Москва, Россия, e-mail: Rozhkov@rosenergo.gov.ru

ОЛЕЙНИКОВА М.И.
Научный сотрудник Лаборатории формирования топливных смесей, ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: airam430@gmail.com

КОРОЛЕВ М.К.
Научный сотрудник Лаборатории формирования топливных смесей, ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: m.korolev.gm@gmail.com

significant energy potential. Their direct use, however, is limited by high content of moisture and ash, fine particle size distribution, and other parameters. A direction for multicomponent coal-based solid fuels development with an addition of carbon-containing materials is proposed, taking into account the physicochemical and thermal properties of the components, as well as the process characteristics that determine the mixture behavior during ignition, combustion, and emission. It is proposed to use organic components to improve flammability, increase the yield of volatile substances, and adjust the ash content in fuel mixtures. An optimization problem for selecting the composition and proportions of fuel mixture components is formed, and as a solution Pareto optimality method is proposed.

Keywords
Multicomponent fuel, carbon-containing material, physical, chemical and thermal properties, optimization, combustion.

Acknowledgements
This research was funded by grants from the Russian Science Foundation (Agreement No. 25-17-20003 dated May 14, 2025) and the Kemerovo Region – Kuzbass (Agreement No. 03/2025 dated April 10, 2025).

For citation
Patrakov Yu.F., Nikitenko S.M., Rozhkov A.A., Oleynikova M.I., Korolev M.K. Multicomponent fuel based on carbon-containing materials: formation principles, properties, and optimization methods. *Ugol'*. 2026;(8):83-89. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-8-83-89.

ВВЕДЕНИЕ

В мировом энергобалансе уголь остается одним из ключевых компонентов ископаемого топлива, несмотря на рост доли возобновляемых источников энергии. По данным Energy Institute Statistical Review of World Energy, мировой объем добычи угля в 2024 г. достиг 9,24 млрд т, что выше на 0,9%, чем в 2023 г. (9,13 млрд т), и тенденция роста его производства продолжается. Основная часть объема приходится на страны Азиатско-Тихоокеанского региона, прежде всего Китай, Индию, Республику Корею и Индонезию [1]. В России добыча за 2024 г., по данным Росстата, составила 429,6 млн т, незначительно снизившись в 2025 г. (на 0,2%).

Мировой спрос на уголь в 2024 г. вырос на 1,2% в энергетическом выражении, увеличившись примерно на 1,4%, или на 123 млн т в физическом выражении. Электроэнергетический сектор продолжает стимулировать спрос на уголь, на его долю приходится две трети мирового потребления.

В 2024 г. мировая выработка электроэнергии на угольных электростанциях выросла на 1% и достигла нового максимума в 10700 ТВт×ч [2].

Несмотря на ужесточение экологических требований в ряде национальных экономик и постепенное сокращение использования угля в энергосистемах развитых регионов, он продолжает играть значимую роль в энергетике и промышленности Китая, Индии, США и многих других стран, где доля угля в структуре выработки электроэнергии составляет от 15 до 75%, а в мире – 34% (*рис. 1*).

В России на внутреннем рынке традиционными сегментами потребления угольной продукции на основе энергетических и коксующихся углей являются (*рис. 2*):

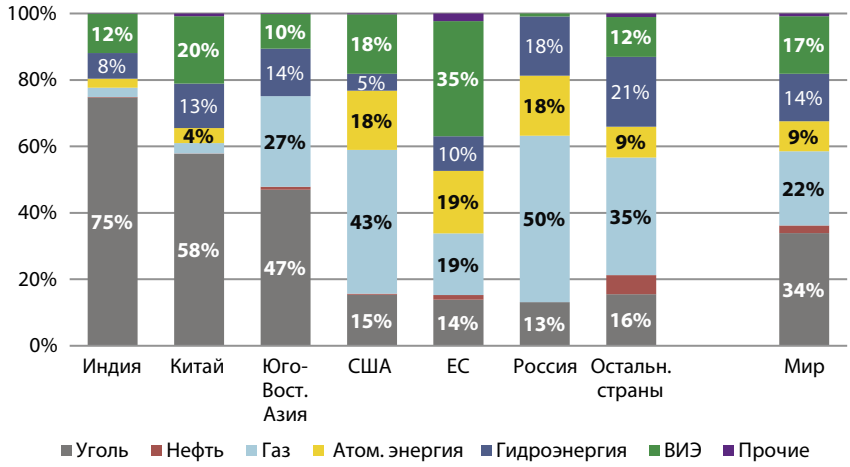
– электроэнергетика и теплоэнергетика – 60,3% в 2025 г.;

– коксохимическое и металлургическое производство – 19,1%;

– коммунально-бытовой сектор, агропромышленный комплекс и население – 13,2%;

– прочие потребители (цементная промышленность, ОАО «РЖД» и др.) – 7,3%.

Но с точки зрения обеспечения энергетической безопасности на национальном и региональном уровнях основной спрос на внутреннем рынке будет определяться дальнейшим поддержанием и развитием угольной генерации. При этом угольная энергетика должна рассматриваться как один из ключе-



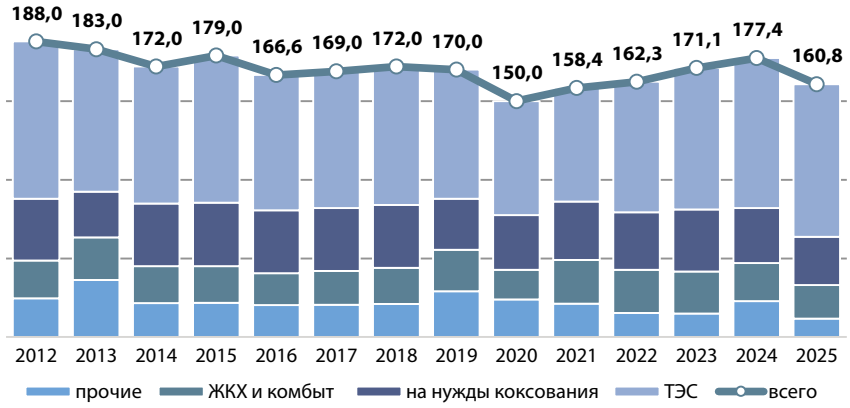
Примечание: прочие – включает внекатегорийную генерацию, статистические расхождения и неуказанные источники.

Источники: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2025.

По России – данные Минэнерго России

Рис. 1. Структура выработки электроэнергии в мире в 2024 г., %

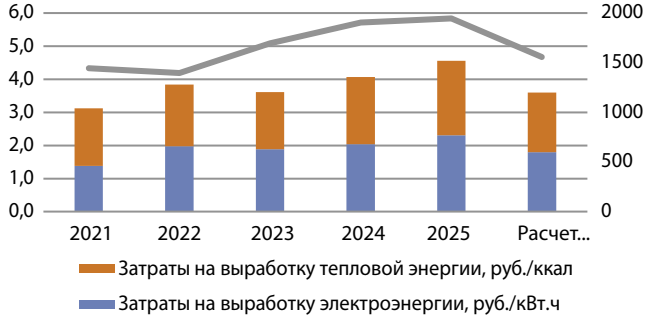
Fig. 1. Structure of global electricity generation in 2024, %



Источник: расчеты авторов по данным угольных компаний.

Рис. 2. Отгрузка российского угля по секторам потребления на внутреннем рынке, млн т

Fig. 2. Russian coal shipments by domestic consumption sector, million metric tons



Источник: расчеты авторов по данным энергетических компаний.

Рис.3. Сравнительные затраты на выработку тепло– и электроэнергии на крупных угольных ТЭС

Fig. 3. Comparative costs of heat and electricity generation at large-size coal-fired thermal power plants

вых векторов развития угольной отрасли, способных обеспечить долгосрочное развитие и снизить зависимость от традиционного сырьевого экспорта. Дальнейшее снижение доли угля в топливном балансе потребления первичных энергоресурсов России (около 12%) и в выработке электроэнергии (около 13%) не способствует обеспечению энергетической безопасности страны [3].

Основным негативным последствием роста угольной генерации в России в настоящее время являются накопление золошлаковых отходов, а также углеродный след в целом в топливно-энергетическом комплексе. По мнению авторов [4, 5], решить экологическую проблему могут перспективные разработки, способные значительно снизить уровень загрязнения: сверхкритические котлы, которые работают при более высокой температуре и сверхкритическом давлении, повышая тепловую эффективность; автоматизация и искусственный интеллект, так как предиктивное обслуживание сокращает простои и продлевает срок службы оборудования; гибридные установки, способные интегрировать уголь с биомассой, метаном или водородом, а также приготавливать МУТ [6, 7, 8].

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МУТ

Известно, что уголь в состоянии ультратонкого помола с частицами размером 20-40 мкм приобретает свойство текучести, которое создает предпосылки для использования его в тех же котлах, что используют природный газ. Ультратонкий помол автоматически доводит уголь до высшей степени обогащения, повышая его теплотворную способность до 7000 ккал/ кг и более, приравнивая этот вид топлива по калорийности к параметрам природного газа.

При этом, по мнению экспертов, значительно повышается экономическая эффективность использования МУТ в «большой» и «малой» энергетике (*рис. 3*).

В себестоимости выработки электроэнергии и тепла на угольных ТЭС 50-70% затрат приходится на приобретение угольного топлива, на топливоподачу и пылеприготовление. Оптимизация процесса топливообеспечения и топливоподготовки, а также приобретения топлива обусловливают возможность снижения затрат на выработку тепло- и электроэнергии и, соответственно, тарифной нагрузки на потребителей.

В этой связи с целью снижения транспортных и операционных затрат предлагается перенести технологию приготовление МУТ с ТЭС на специальные заводы по их производству непосредственно в регионах добычи угля, для

чего необходимо решить главную проблему – проблему транспортировки взрывоопасной пылеугольной смеси: необходимы специальные вагоны, обеспечивающие безопасную транспортировку и выгрузку МУТ. Существующие вагоны-хопперы для перевозки цемента, муки и других пылевидных грузов не годятся для этой цели, так как в их конструкции не решена проблема предотвращения опасности взрыва пылеугольной смеси. Соответственно, стоимость генерации 1 кВт·ч электроэнергии на ТЭС может быть существенно снижена, так как увеличение степени заполнения вагона полезной массой топлива может снизить удельные транспортные расходы на 1 т у.т., поставляемого на ТЭС, по предварительным расчетам до 20%. Косвенный экономический эффект будет значительно выше. Во-первых, появится стандартизованное угольное топливо, пригодное для сжигания в унифицированных котлах тепловых электростанций, что приведет к удешевлению выпуска новых котлов, реальной конкуренции производителей пылеугольного топлива и стабилизации его цены на внутреннем рынке. Во-вторых, это топливо становится классическим биржевым товаром со всеми вытекающими последствиями цивилизованного рынка, фьючерсными контрактами и хеджированием ценовых рисков. По сути, судьба угольной энергетики может измениться в сторону ее активного роста, в том числе за счет конкуренции с газом.

Основным сырьем (базовыми компонентами) для приготовления МУТ должны быть угли энергетических марок и прочая углепродукция (отсевы, промпродукт, кеки). Доля шламов в общем объеме отходов углеобогащения незначительна (448,4 тыс. т в 2025 г., что составляет 0,65%) и может представлять интерес для их использования в приготовлении МУТ исключительно в виде добавок в основную смесь.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ УГЛЕОТХОДОВ

Отходы образуются на всех стадиях добычи и переработки угля и включают угольную мелочь, пыль, шламы, отсевы, кеки. В зависимости от характеристик месторождения и применяемых технологий добычи и обогащения твердые отходы (включая угольную породу, мелочь и шламы) могут составлять 15-20% от массы добываемого угля [9], точные значения зависят от конкретного предприятия и характеристик сырья.

Наиболее сложной для дальнейшей переработки и утилизации являются угольные шламы и кеки, характеризующиеся высокой влажностью, зольностью и мелким гранулометрическим составом, что ограничивает их прямое использование в энергетике. На ТЭС широко используют для приготовления пылеугольного топлива промпродукт – смесь сростков угольных и породных компонентов.

С точки зрения энергетического потенциала, отходы угольной промышленности представляют собой вторичное углеродосодержащее сырье с теплотой сгорания 8-18 МДж/кг (в пересчете на сухое вещество), что существенно ниже по сравнению с бурым углем (26-32 МДж/кг), а тем более с каменным углем (32-37 МДж/кг) [10]. Но в абсолютных значениях суммарный энергетический потенциал накопленных отходов значительный, особенно в странах с широко развитой угольной промышленностью (Китай, Индия, Россия). Исследования показывают, что при специальной подготовке и комбинировании с другими компонентами отходы угольной промышленности можно рассматривать как основу для создания МУТ, пригодного для использования в существующих энергетических установках [11, 12].

ПОДХОДЫ К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

Ранее отходы углеобогащения рассматривались как топливо, пригодное лишь для ограниченного применения вблизи мест добычи. Прямое сжигание угольной мелочи и шламов в существующих котельных установках сопровождалось нестабильностью процессов горения, снижением КПД, высокими объемами выбросов загрязняющих веществ из-за высокой зольности и мелкодисперсного состава [13, 14].

В настоящее время активно развивается концепция композитных твердых топлив, в рамках которой отходы углеобогащения используются в качестве базового компонента топливной смеси с добавлением дополнительных компонентов, нивелирующих существующие недостатки. В качестве таких компонентов рассматриваются коммунальные осадки, сельскохозяйственные отходы, а также отходы смежных отраслей промышленности. Такой подход позволяет формировать требуемые свойства топлива (теплоту сгорания, зольность, стабильность горения и т.д.) без радикальной модернизации существующего котельного оборудования.

ТИПОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ МУТ

При разработке многокомпонентных твердых топлив на основе угля и отходов угольной отрасли важно учитывать физико-химические и теплотехнические свойства компонентов, технологические характеристики, определяющие поведение смеси при воспламенении, горении, эмиссиях и другие аспекты эксплуатации, что предполагает целенаправленный подбор компонентов. В таких смесях уголь сохраняет роль базового энергетического носителя, остальные компоненты выполняют корректирующие и/или стабилизирующие функции. Это позволяет адаптировать свойства топлива к требованиям и технологическим параметрам существующих котельных установок без глубокой модернизации оборудования.

Анализ зарубежных публикаций показывает, что составы топливных смесей формируются из трех основных групп компонентов: угольных материалов, органических добавок и минеральных корректоров. Данная классификация отражает не происхождение сырья, а его роль в формировании свойств топлива.

К базовым компонентам относятся энергетические угли различных марок, угольная мелочь, шламы углеобогащения и фильтр-кеки. Их объединяют наличие значительной доли углерода, высокая теплотворная способность, позволяющие использовать их в качестве основного источника энергии. Однако по сравнению с товарным энергетическим углем отходы имеют более высокую зольность, влажность, более мелкодисперсный гранулометрический состав, что обусловливает необходимость их комбинирования с корректирующими добавками [15].

Органические компоненты в угольных топливных смесях используются для улучшения воспламеняемости, повышения выхода летучих веществ и коррекции зольности. К этой группе относятся сухие осадки сточных вод, сельскохозяйственные и древесные отходы. В отличие от альтернативных топливных концепций, где уголь полностью замещается биогенным сырьем, в угольных смесях органическая составляющая вводится в небольших долях и не нарушает роль угля в качестве основного энергетического носителя.

Исследования совместного сжигания угля с осадками сточных вод показывают, что при доли органической добавки в пределах 5-20% по сухой массе возможно улучшение характеристик воспламенения без сильного снижения теплотворной способности смеси. При повышении доли органики возрастает зольность и ухудшаются условия шлакообразования, что ограничивает применение [16]. С точки зрения методологии оценки реакционной способности и кинетики горения применяются термогравиметрические подходы (TG/DTG), а также их сочетание со спектроскопическими методами для анализа газообразных продуктов. Варьирование долями углей разного происхождения и близких по зольности добавочных материалов позволяет управлять температурами воспламенения и выгорания, а также снижать риски неполного сгорания [12, 13, 14, 15, 16, 17].

Для систематизации данных о МУТ предлагается использовать функциональную классификацию по роли компонентов в формировании свойств топлива:

– органические добавки с высоким выходом летучих веществ могут применяться для регулирования воспламеняемости и режима сгорания;

– минеральные добавки используются для управления зольностью, выбросами соединений серы и хлора, процессами шлакообразования и коррозии;

– связующие/структурообразующие компоненты обеспечивают технологическую подготовку смеси, прочность, пылеобразование, гранулирование/брикетирование, стабильность при хранении и транспортировке.

При подборе состава важно учитывать, что эффект каждой группы проявляется не изолированно: органическая составляющая определяет в первую очередь реакционную способность и кинетику горения; минеральная задает поведение золы в топке и допустимые эксплуатационные режимы. Основные компоненты представляют собой коммунальные отходы, сельскохозяйственную и лесную биомассу, промышленные органические отходы, отработанные резинотехнические изделия. Коммунальные отходы (осадки сточных вод) при введении в угольную смесь улучшают воспламеняемость и повышают выход летучих веществ [18]. Однако необходим учет влияния минеральной составляющей и потенциально опасных примесей (соединений хлора, серы и т.д.) на состав золы и выбросы загрязняющих веществ. Сельскохозяйственная и лесная биомасса (солома, шелуха, опилки и пр.) используются для повышения реакционной способности смеси и частичного замещения ископаемого углерода. Влияние биомассы проявляется в изменении температуры воспламенения, режима горения, трансформации состава золы, что может влиять на склонность к шлакованию и коррозии в зависимости от типа котла и рецептуры топлива [19].

Промышленные органические отходы (пищевые, бумажные, нефте– и маслосодержащие шламы) можно рассматривать как источник летучих веществ и связующий компонент. Перспективность этих добавок определяется доступностью, вариабельностью состава, санитарными ограничениями и необходимостью стабилизации свойств перед введением в сухую угольную смесь.

Применение отработанных резинотехнических изделий (шины, транспортерные ленты и пр.) в качестве компонента МУТ требует дополнительных затрат на их подготовку к сжиганию. Но при использовании их, например в цементных печах, где протекают высокотемпературные процессы (средняя температура более 1400°C) позволяет применять резинотехнические изделия без предварительной подготовки.

Термогравиметрические исследования совместного сжигания угля с биомассой фиксируют ускорение начальных стадий окисления и повышение доли летучих соединений. Эти эффекты описаны для широкого диапазона концентраций смесей «уголь+биомасса» и типов предварительной обработки биомассы, включая сравнение поведения биочаров, полученных разными методами, при совместном сжигании с угольной пылью [20]. Для задачи оптимизации важны исследования по кинетике и тепловому поведению угольных смесей с биомассой. Данные исследования показывают, что предварительная обработка биомассы существенно влияет на физико-химические показатели горения, а также на выбросы летучих соединений, зольность.

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА МУТ

Основной задачей оптимизации состава МУТ являются получение материала с заданными энергетическими и технологическими характеристиками и возможности его использования в существующих котельных установках. Ключевая особенность – управляемость свойствами за счет вариации долей компонентов смеси. Можно выделить следующие целевые параметры топливных смесей [14]:

– низшая теплота сгорания, которая отражает количество энергии, доступное при сгорании топлива;

– температура воспламенения и скорость выгорания, которые определяют кинетику горения и устойчивость процесса в котельных установках;

– зольность и минеральный и гранулометрический составы топлива, которые влияют как на процессы горения, так и на объемы выбросов загрязняющих веществ.

Комплексное рассмотрение этих параметров позволяет обеспечить баланс между энергетической эффективностью и эксплуатационной безопасностью при использовании многокомпонентного топлива. Соответственно, управление характеристиками многокомпонентного топлива осуществляется за счет вариации долей компонентов смеси. Выбор состава и долей компонентов смеси осуществляется посредством решения оптимизационной задачи, в результате чего выявляется такое соотношение компонентов, при котором все целевые параметры топливной смеси остаются в области допустимых значений, определяемых технологическими особенностями объекта, на котором планируется

использование этой смеси, максимизируется рабочая теплота сгорания и минимизируется ее себестоимость.

К целевым параметрам топливных смесей отнесены:

1) зольность, выражаемая в %;

2) влажность, выражаемая в %;

3) содержание серы, выражаемое в %;

4) гранулометрический состав, выражаемый в мм;

5) температура воспламенения, выражаемая в °С, – это минимальная температура, при которой летучие продукты пиролиза угля над поверхностью угольных частиц выделяются со скоростью, достаточной для воспламенения при воздействии источника зажигания;

6) рабочая теплота сгорания определяется исходя из максимальной теплоты сгорания, скорректированной на содержание золы и влаги в топливной смеси по следующей формуле:

$$Q^r = Q^{\max} - \frac{(100 - A - W)}{100},$$

где Q^r – рабочая теплота сгорания; $Q^{\max}$ – максимальная теплота сгорания; A – зольность смеси; W – влажность смеси;

7) себестоимость, выражаемая в тыс. руб./т.

Характеристики компонентов задаются в соответствии с сертификатами соответствия. Себестоимость компонента определяется как цена его приобретения и доставки до места изготовления топливной смеси.

Решение оптимизационной задачи осуществляется по следующему алгоритму:

1) гармонизация характеристик компонентов смеси и нормализация критериев оптимизации линейным методом;

2) расчет целевых параметров для множества комбинаций долей компонентов с шагом долей в 10%;

3) исключение вариантов, для которых по крайней мере один из целевых параметров выходит за область допустимых значений;

4) определение Парето-оптимальных вариантов комбинаций долей;

5) выбор одного из Парето-оптимальных вариантов в качестве предпочтительного, который осуществляет лицо, принимающее решение;

6) расчет целевых параметров для множества комбинаций долей компонентов с шагом в 1%, применительно к комбинациям долей, значения которых округляются до значений варианта, выбранного в качестве предпочтительного на этапе 5;

7) исключение вариантов, для которых по крайней мере один из целевых параметров выходит за область допустимых значений;

8) определение Парето-оптимальных вариантов комбинаций долей;

9) выбор одного из Парето-оптимальных вариантов в качестве предпочтительного, который осуществляет лицо, принимающее решение;

10) расчет целевых параметров для множества комбинаций долей компонентов с шагом в 0,1%, применительно к комбинациям долей, значения которых округляются до значений варианта, выбранного в качестве предпочтительного на этапе 9;

11) исключение вариантов, для которых по крайней мере один из целевых параметров выходит за область допустимых значений;

12) определение Парето-оптимальных вариантов комбинаций долей;

13) выбор одного из Парето-оптимальных вариантов в качестве предпочтительного, который осуществляет лицо, принимающее решение.

Реализация первых пяти этапов позволяет ориентировочно определить оптимальное соотношение компонентов топливной смеси, а реализация 6-13 этапов позволяет уточнить эти значения до 0,1%.

В целом авторы согласны [20, 21], что мнение об отсталости и бесперспективности углеэнергетики ошибочно в принципе и является результатом недостаточной информированности или поверхностных оценок. Как и в любой сфере экономики, здесь необходимо прилагать усилия в поиске ранее неиспользованных либо просто недоступных на прежних технологических этапах возможностей развития экономики угледобывающих регионов. В этом ряду производство МУП может стать высокорентабельным проектом с большими перспективами масштабирования самого принципа усреднительного производства. Реализация проекта потребует как решения задач узкоспециализированных, сконцентрированных на проекте, так и широких междисциплинарных исследований.

ВЫВОДЫ

В статье проанализированы современные и перспективные подходы к энергетическому использованию углеродосодержащих материалов в составе многокомпонентных угольных топлив. Показано, что отходы угольной промышленности представляют собой вторичное углеродосодержащее сырье с существенным энергетическим потенциалом, однако их прямое использование без дополнительной подготовки ограничено.

Авторами сформулирована оптимизационная задача выбора состава и долей компонентов топливной смеси и предложено ее решение методом Парето-оптимальности, в результате чего выявляется такое соотношение компонентов, при котором все целевые параметры проектируемого многокомпонентного угольного топлива остаются в области допустимых значений, максимизируется рабочая теплота сгорания, минимизируются другие технологические параметры, а также себестоимость.

Список литературы • References

1. Statistical Review of World Energy 2025. KPMG, 2025. URL: https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/sk/pdf/2025/Statistical-Review-of-World-Energy-2025.pdf.
2. Global Energy Review 2025. International Energy Agency (IEA), 2025. URL: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025.
3. Шафраник Ю.К. Угольная отрасль – от феномена реструктуризации до современных проблем и путей их решения // Горная промышленность. 2026;(2). [Электронный ресурс]. URL: https://mining-media.ru/ru/article/interview/20111-ugolnaya-otrasl-ot-fenomena-restrukturizatsii-do-sovremennykh-problem-i-putej-ikh-resheniya.

4. Использование технологии пневмосепарации для обогащения мелких классов энергетических углей / Ю.Ф. Патраков, С.А. Семенова, С.М. Никитенко и др. // Кокс и химия. 2026;(4):8-13.
Patrakov Yu.F., Semenova S.A., Nikitenko S.M., Stepanenko A.A., Stepanenko A.I. Use of Pneumatic Separation Technology for Enrichment of Small Classes of Energy Coals. *Koks i khimiya*. 2026;(4):8-13. (In Russ.).
5. Влияние распределения минеральных примесей на обогатимость угольных шламов / Ю.Ф. Патраков, С.А. Семенова, С.М. Никитенко и др. // Горная промышленность. 2025;(4S):58-62. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-58-62.
Patrakov Yu.F., Semenova S.A., Nikitenko S.M., Yarkova A.V. Effects of mineral impurities distribution on coal sludge washability. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):58-62. (In Russ.). https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-58-62.
6. Алешинский Р.Е. Актуальность создания нового российского угольного котлоагрегата // Энергетик. 2024;(1):9-13. URL: http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/2394.
Aleshinsky R.E. The relevance of creating a new Russian coal mining enterprise. *Energetik*. 2024;(1):9-13. (In Russ.). URL: http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/2394.
7. Угольная промышленность – образ будущего в условиях новых технологических и энергетических трендов (прогнозы, анализ рынков, технологии, финансово-экономические оценки): монография / Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина, А.А. Рожков и др. М.: ИНЭИ РАН, 2026. 312 с. М.: ИНЭИ РАН, 2026. 312 с. URL: https://www.eriras.ru/files/monografiya_plakitkin.pdf.
8. Towards carbon neutrality: A comprehensive study on the utilization and resource recovery of coal-based solid wastes. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2025;(12):34. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s40789-025-00775-4.
9. Liu H., Gong S., Jia C., Wang Q. TG-FTIR analysis of co-combustion characteristics of oil shale semi-coke and corn straw. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017;(127):2531-2540.
10. Wang H., Zhang J., Wang G. et al. Characteristics and kinetic analysis of co-combustion of brown coal and anthracite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016;126(2):447-454. DOI: 10.1007/s10973-016-5557-9.
11. Jiao Y., Lv B., Fan W., Li L., Wang M., Xing B. Preparation and application prospects of coal-based carbon materials: A comprehensive review. *Fuel Processing Technology*. 2025. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838825005092.
12. Leone T.G., Anderson J.E., McCormick R.L. Redefining fuel heating value for engines: Accounting for heat of vaporization. *Fuel*. 2026;(415). URL: https://research-hub.nlr.gov/en/publications/redefining-fuel-heating-value-for-engines-accounting-for-heat-of-/.
13. Özgen S. et al. Coal recovery from coal washing plant tailings with Knelson concentrator. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2019. DOI: 10.1080/19392699.2019.1665033.
14. Guo S. et al. Effect of blending sewage sludge with coal on combustion and ash slagging behavior. *RSC Advances*. 2019. DOI: 10.1039/C9RA04243A.
15. Galvan D., Effting L., Cremasco H., Conte-Junior C.A. Recent applications of mixture designs in beverages, foods, and pharmaceutical health: A systematic review. *Foods*. 2021;10(8):1941. DOI: 10.3390/foods10081941.
16. Xu Y., Wenkun Z. et al. Investigation of Combustion and NO/SO_2 Emission Characteristics during the Co-Combustion Process of Torrefied Biomass and Lignite. *Molecules*. 2024. URL: https://www.mdpi.com/1420-3049/29/12/2728.
17. Жуйков А., Глушков Д., Плешко А., Гришина И., Чичерин С. Совместное сжигание угля и биомассы: нагрев поверхностного шлака и дымовых газов // Fire. 2025;8(3):106. URL: https://www.mdpi.com/2571-6255/8/3/106.
Zhuykov A., Glushkov D., Pleshko A., Grishina I., Chicherin S. Combined combustion of coal and biomass: heating of surface slag and flue gases. *Fire*. 2025;8(3):106. (In Russ.). URL: https://www.mdpi.com/2571-6255/8/3/106.
18. Chen C., Zhao X., Qi D., Yang K., Xu L., Li T., Ying Y., Liu D. Study of sewage sludge/coal co-combustion by thermogravimetric analysis and single particle combustion method. *Energy & Fuels*. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/324268091_Study_of_Sewage_SludgeCoal_Co-Combustion_by_Thermogravimetric_Analysis_and_Single_Particle_Co-Combustion_Method.
19. Gil M.V., Casal D., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. *Bioresource Technology*. 2010;(101):5601-5608.
20. Wang G., Zhang J., Shao J. et al. Thermal behavior and kinetic analysis of co-combustion of waste biomass/low rank coal blends. *Energy Conversion and Management*. 2016;(124):414-424. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.014.
21. Ольховский М.И. Проект производства стандартизованного угольного топлива и перспективы применения в энергетике. В сборнике: Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс 2012) / Материалы XIV Международной научно-практической конференции. редколлегия: В.Ю. Блюменштейн (ответственный редактор), В.А. Колмаков. 2012. С. 85-90.

Authors Information

Patrakov Yu.F. – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Fuel Mixture Formation Laboratory, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: yupat52@gmail.com

Nikitenko S.M. – Doctor of Economic Science, Associate Professor, Chief Researcher, Fuel Mixture Formation Laboratory, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: nsm.nis@mail.ru

Rozhkov A.A. – Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of the Department of Analytical Research and Short-Term Forecasting of the Coal Industry Development, Russian Energy Agency of the Ministry of Energy of Russia, Moscow, 127083, Russian Federation, e-mail: Rozhkov@rosenergo.gov.ru

Oleynikova M.I. – Researcher, Fuel Mixture Formation Laboratory, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: airam430@gmail.com

Korolev M.K. – Researcher, Fuel Mixture Formation Laboratory, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: m.korolev.gm@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.06.2026
Поступила после рецензирования: 17.07.2026
Принята к публикации: 30.07.2026

Paper info

Received June 29, 2026
Reviewed July 17, 2026
Accepted July 30, 2026