

УДК 622.7 © Е.В. Волкодавова¹, Л.Ф. Бердникова², 2026

UDC 622.7 © E.V. Volkodavova¹, L.F. Berdnikova², 2026

¹ ФГАОУ ВО «Самарский государственный экономический университет», 443090, г. Самара, Россия

¹ Samara State University of Economics, Samara, 443090, Russian Federation

² ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 445020, г. Тольятти, Россия

² Togliatti State University, Togliatti, 445020, Russian Federation

✉ e-mail: vev.sseu@gmail.com

✉ e-mail: vev.sseu@gmail.com

Влияние обогащения угля на его потребительские свойства и соответствие стандартам

Impact of coal preparation on its consumer properties and compliance with standards

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-4-72-76>

ВОЛКОДАВОВА Е.В.

Профессор института Менеджмента ФГАОУ ВО «Самарский государственный экономический университет», 443090, г. Самара, Россия, e-mail: vev.sseu@gmail.com

БЕРДНИКОВА Л.Ф.

Канд. экон. наук, доцент, доцент Института финансов, экономики и управления ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 445020, г. Тольятти, Россия, e-mail: bleylaf@mail.ru

В статье рассмотрено влияние различных технологий обогащения угля на изменение его качественных характеристик и соответствие нормативным требованиям, предъявляемым к коксующимся и энергетическим маркам. На основе анализа отечественных и международных стандартов, а также сравнительных данных по энергетическому углю марки ДР и коксующемуся углю марки К показаны результаты применения гравитационных, флотационных, магнитных, а также сенсорных и интеллектуализированных технологий, включая ХРТ-сепарацию. Особое внимание уделено эффективности комбинированных схем обогащения и их способности обеспечивать снижение степени зольности и содержания серы до требуемых значений. Рассмотрены технологические и экономические ограничения, с которыми сталкиваются предприятия при переработке угля с несоответствующими стандартам и требованиям заказчика исходными характеристиками. Сделан вывод о том, что выбор оптимальной технологии должен учитывать как природные свойства угля, так и требования конечного потребителя.

Ключевые слова: углеобогащение, зольность, коксующийся уголь, энергетический уголь, ХРТ-сортировка, гравитационные методы, флотация, паспорт качества, комбинированные технологии.

Для цитирования: Волкодавова Е.В., Бердникова Л.Ф. Влияние обогащения угля на его потребительские свойства и соответствие стандартам // Уголь. 2026;(4):72-76. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-4-72-76.

Abstract

The article examines the impact of various coal preparation methods on changes in its quality characteristics and compliance with regulatory requirements for the coking and energy grades. The paper discusses

the results of applying gravity, flotation, magnetic, sensor and smart technologies, including XRT separation based on analyzing domestic and international standards, as well as comparative data on Grade DR energy coal and Grade K coking coal. Particular attention is paid to the efficiency of combined preparation schemes and their ability to reduce the ash and sulfur content to the required levels. The research focuses on technological and economic constraints faced by the companies when processing coal with initial characteristics that fail to meet standards and customer requirements. A conclusion is made that the selection of the optimal method should be based on both the natural properties of coal and the requirements of the end consumer.

Keywords

Coal preparation, ash content, coking coal, thermal coal, XRT sizing, gravitational methods, flotation, quality certificate, combined methods.

For citation

Volkodavova E.V., Berdnikova L.F. Impact of coal preparation on its consumer properties and compliance with standards. *Ugol'*. 2026;(4):72-76. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-4-72-76.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение требований к качеству угольной продукции обусловлено как внутренними производственными приоритетами, так и внешними условиями – ужесточением экологических норм, необходимостью обеспечения технологической совместимости с оборудованием потребителей, а также растущей конкуренцией на глобальном энергетическом рынке [1]. В этих условиях обогащение угля выступает неотъемлемым звеном производственно-технологической цепочки, направленной на формирование свойств угля, соответствующих современным стандартам качества [2].

От параметров качества, зафиксированных в паспорте угля после обогащения, в значительной степени зависят возможности его реализации на внутреннем и внешнем рынках, экономическая эффективность экспортных поставок, а также применимость топлива в рамках технологических схем энергетических и металлургических производств, ориентированных на использование угольной продукции определенного состава.

Анализ научной литературы показывает, что вопросы углеобогащения активно рассматриваются как в технологическом, так и в экономическом контексте. Существенное внимание уделяется разработке и совершенствованию методов гравитационного, флотационного и магнитного обогащения, а также комбинированных схем, применяемых с целью повышения выхода кондиционного продукта [3]. Отдельные исследования акцентируют внимание на корреляции между глубиной обогащения и степенью соответствия угля установленным качественным критериям, включая содержание летучих веществ, теплоту сгорания, серу, влагу и золу [4, 5]. Исследователи подчеркивают, что рациональный выбор технологии обогащения должен основываться на учете минерального

состава исходного угля, его гранулометрических характеристик и целевого применения [6].

Значительная часть научных трудов посвящена экономической оценке эффективности процессов обогащения угля, включая анализ капитальных и эксплуатационных затрат, влияния на себестоимость готовой продукции, а также возможности увеличения экспортной выручки за счет улучшения качественных показателей [7, 8, 9].

Несмотря на имеющийся объем исследований, в научной литературе сохраняется недостаток работ, в которых системно рассматривается изменение паспорта качества угля в зависимости от применяемой технологии обогащения.

Цель исследования – оценить влияние различных технологий обогащения угля на изменение его потребительских свойств и структуру паспорта качества с позиции соответствия современным стандартам.

Задачи исследования: систематизировать и классифицировать существующие технологии углеобогащения по критериям результативности, характеру изменения основных параметров качества угля; провести сравнительный анализ паспортов качества угля до и после обогащения на основе конкретных примеров, с определением степени соответствия полученного продукта установленным стандартам и выявлением потенциала повышения его потребительской ценности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Систематизация и классификация технологий углеобогащения по критериям результативности

Повышение качества топлива достигается за счет снижения вредных примесей и увеличения энергетических характеристик, что способствует повышению экономической рентабельности его использования, снижению выбросов при сжигании и расширению географии поставок. Авторские систематизация и классификация технологий углеобогащения по критериям результативности показана в *табл. 1*.

Систематизация современных технологий обогащения угля позволяет проследить, насколько разнообразны подходы к повышению качества угольной продукции в зависимости от состава, фракционного состояния и назначения топлива. Наряду с широко применяемыми гравитационными и флотационными методами актуальными становятся сухие и комбинированные технологии, позволяющие обогащать уголь при дефиците водных ресурсов и усложнении состава исходного сырья. Каждая из технологий имеет определенные технические и технологические границы применимости, определяемые как природными свойствами угля, так и задачами переработки.

Выбор метода обогащения должен основываться на детальном учете минералогического состава, степени зольности, влажности и дисперсности исходного материала, а также на требованиях к конечному продукту со стороны потребителя.

Систематизация и классификация технологий углеобогащения по критериям результативности

Systematization and classification of coal preparation methods according to their performance criteria

Технология	Принцип действия	Область применения	Преимущества	Ограничения
Гравитационные методы	Разделение по плотности и размеру в воде или воздухе (отсадка, гидроциклоны, столы)	Основной метод обогащения угля любых фракций	Простота, экономичность, эффективное удаление минеральной породы и крупных плотных примесей (песчаники, сланцы, пирит), масштабность	Ограниченная точность для мелких фракций, эффективность зависит от размера и зернистости материала
Флотация (пенная)	Адгезия угольных частей к пузырькам воздуха в пульпе с реагентами	Мелкодисперсный уголь, тонкая очистка; особенно эффективна для высокозольных углей	Высокое качество концентрата, снижение содержания серы и золы, повышение теплотворной способности	Большие водо- и реагентозатраты, сложность реагентной системы
Сухое (пневматическое) обогащение	Разделение в воздушной среде по плотности и размеру	Обработка мелких и средних фракций, регионы с дефицитом воды	Не требует воды, низкие капитальные и эксплуатационные затраты, экологичность	Менее эффективно для влажных материалов, ниже производительность, ограничено точностью в тонких классах
Магнитная сепарация	Принцип разделения по магнитным свойствам минералов	Используется при наличии магнитного минерала (например, глинистые породы)	Эффективная очистка от минералов при низкой влажности	Применима не ко всем углям, требует предварительного измельчения, чувствительна к влажности
Электростатическое / трибоэлектростатическое	Разделение в электрическом поле по электропроводности и способности к заряду	Тонкодисперсный уголь (< 300 мкм), высококачественные продукты	Возможность глубокой очистки мелких фракций, высокая селективность	Низкая пропускная способность, требует предварительной сухости, специализированное оборудование
Комбинированные (термо/пиромагнитные)	Предварительное термическое воздействие (полукоксование), затем магнитная или гравитационная сепарация	Полукоксовый уголь, уголь с высоким содержанием пирита и труднообогащаемый уголь, где традиционные методы неэффективны	Повышает пористость, улучшает магнитные свойства за счет преобразования пирита в магнитные оксиды железа	Энергозатратность, сложность технологии, требует точного контроля термообработки, чувствителен к исходному составу угля
Сенсорные и интеллектуализированные технологии (XRT-сепарация)	Сепарация на основе разницы в поглощении рентгеновского излучения (Dual-Energy XRT) между углем и породой. Сухая предварительная сортировка с пневматическим отсевом примесей	Предварительное удаление пустой породы из крупных фракций угля (10-100 мм). Оптимально для обогащения энергетического угля с высокой степенью зольности	Высокая точность удаляет > 90 % породы, снижает нагрузку на последующие стадии обогащения (флотацию, гравитацию), без воды, экологически безопасен и подходит для засушливых регионов	Стоимость оборудования, требует адаптации к конкретным видам угля, чувствительна к размеру частиц (оптимальна для фракций 10-100 мм).

Составлено авторами по данным источников [10, 11, 12, 13, 14].

Сравнительный анализ паспортов качества угля до и после обогащения (на примере энергетического угля марки ДР (длиннопламенный рядовой) и коксующегося угля марки К)

Исходные характеристики энергетического угля до обогащения показаны в табл. 2.

Характеристики после гравитационного обогащения (отсадка + флотация) показаны в табл. 3, до обогащения – в табл. 4.

Зольность снижена на 37% (с 28,5% до 18%), что соответствует категории «ЗБ» по ГОСТ 25543-2015 ($A^d \leq 24\%$). Теплота сгорания повысилась до 5500 ккал/кг, что соответствует категории «ЗБ» ($Q^{bd} \geq 5200$ ккал/кг), уступая на 100 ккал/кг порогу категории «2Б». Полученный уголь отвечает базовым требованиям к импортному энергетическому углю в Турции ($A^d \leq 20\%$, $S_{ot}^t \leq 1,8\%$)

Таблица 2

Исходные характеристики энергетического угля до обогащения

Initial characteristics of thermal coal before preparation

Показатель	Значение	Норматив
Зольность (A), %	28,5	$\leq 24,0^*$
Содержание общей серы (S), %	2,1	$\leq 2,0$
Влажность (W), %	12	$\leq 15,0$
Теплота сгорания (Q), ккал/кг	4800	≥ 5200

* В ГОСТ/ТУ для энергетических марок угля допустимы значения до 25-28%, но на практике, особенно при экспорте или на высокоэффективных ТЭЦ, предпочитают уголь с зольностью $\leq 24\%$, иногда даже $\leq 20\%$.

и потенциально может быть приведен в соответствие с положениями EN 12979 при соблюдении прочих норм стандарта.

Таблица 3

Характеристики после гравитационного обогащения (отсадка + флотация)
Characteristics after the gravitational preparation (jigging + flotation)

Показатель	Значение
Зольность (A), %	18
Содержание общей серы (S), %	1,6
Влажность (W), %	10
Теплота сгорания (Q), ккал/кг	5500

Таблица 4

Коксующийся уголь марки К.
Исходные данные (до обогащения)
Coking coal, Grade K. Initial data (before preparation)

Параметр	Значение	Требования для коксования
Зольность (A ^d), %	22,0	≤ 9,0
Сера (S _{от} ^t), %	1,8	≤ 1,2
Летучие вещества (V ^{daf}), %	28,0	24–32
Пластический слой (Y), мм	14,0	≥ 14

Таблица 5

После комбинированного обогащения (XRT + флотация + магнитная сепарация)
After combined preparation (XRT + flotation + magnetic separation)

Параметр	Значение	Изменение
Зольность (A ^d), %	8,5	-13,5
Сера (S _{от} ^t), %	1,1	-0,7
Летучие вещества (V ^{daf}), %	27,0	-1,0
Пластический слой (Y), мм	15,0	+1,0

Выявлены явные проблемы. Высокая зольность в значительной степени ограничивает возможность использования угля в коксохимии. Сера превышает лимит для металлургического кокса (табл. 5).

Снижение зольности на 61,4% (с 22% до 8,5%) обеспечило получение угля, пригодного для коксования по стандартам металлургических предприятий. Снижение серы повышает ценность для экспорта (Китай принимает S_{от}^t ≤ 1,2%).

Полученные данные подтверждают высокую эффективность обогащения как энергетического, так и коксующегося угля по ключевым показателям качества. Гравитационные методы, примененные к углю марки ДР, позволили достичь необходимого снижения зольности и содержания серы, одновременно увеличив теплоту сгорания до уровня, соответствующего установленным требованиям для внутреннего и внешнего рынков.

Комплексная схема обогащения, включающая XRT-сортировку, флотацию и магнитную сепарацию, показала высокую технологическую эффективность при переработке коксующегося угля марки К, позволив существенно улучшить его качественные характеристики.

ВЫВОДЫ

Обогащение угля представляет собой не только способ повышения его качественных характеристик, но и необходимое условие приведения сырья в соответствие с нормативными и коммерческими требованиями. Современные технологии обогащения, включая комбинированные и интеллектуальные подходы, позволяют перерабатывать уголь с неблагоприятными исходными характеристиками с целью получения продукции, удовлетворяющей требованиям энергетической и металлургической отраслей, а также стандартам международных заказчиков.

Процесс обогащения угля сопряжен с рядом экономических и технологических сложностей. Прежде всего, обогащение требует значительных капитальных и последующих текущих затрат. Капитальные вложения связаны со строительством и техническим оснащением обогатительных фабрик, закупкой высокотехнологичного оборудования. Текущие затраты формируются из расходов на электроэнергию, реагенты, техническое обслуживание, персонал и утилизацию отходов, причем затраты возрастают при переходе к многостадийным или комбинированным схемам обогащения.

Дополнительные сложности обусловлены необходимостью адаптации технологий к конкретному типу угля [15]. Например, уголь с высокой степенью зольности, тонким вкраплением минералов или сильно различным гранулометрическим составом требуют индивидуального подбора технологических параметров и режимов обогащения. Это увеличивает риски недостижения требуемого качества сырья при высоких затратах, что может привести к отсутствию экономического эффекта и даже убыточности процессов.

Как итог, при всех несомненных преимуществах обогащение угля остается затратным и технологически сложным процессом, эффективность которого напрямую зависит от качества исходного сырья, грамотного подбора технологической схемы его обогащения и уровня технологического оснащения предприятия.

Список литературы • References

1. Демченко И.И., Иванчук А.О. Получение и доставка высококачественных углепродуктов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 4. С. 84-91. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-4-84-91.
Demchenko I.I., Ivanchuk A.O. Receiving and delivery of high-quality carbon products. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2023;(4):84-91. (In Russ.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-4-84-91.
2. Абузов А.Ю., Бердникова Л.Ф. Реструктуризация угольной промышленности: экономические и экологические приоритеты // Уголь. 2025;(7):50-53. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-50-53.
Abuzov A.Yu., Berdnikova L.F. Restructuring the coal industry: economic and environmental priorities. *Ugol'*. 2025;(7):50-53. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-7-50-53.
3. Цивилев С.Е. Современные технологии – залог устойчивого развития угольных предприятий Кузбасса // Уголь. 2023;(8):7-8. <https://ugolinfo.ru/Jour/082023.pdf>.

- Tsivilev S.E. Modern technologies are the key to the sustainable development of Kuzbass coal enterprises. *Ugol'*. 2023;(8):7-8. <https://ugolinfo.ru/Jour/082023.pdf>. (In Russ.).
4. Новые угольные технологии: тенденции и перспективы / С.М. Никитенко, Е.В. Гоосен, М.К. Королев и др. // Уголь. 2022;(S12): 4-10. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-4-10. Nikitenko S.M., Goosen E.V., Korolev M.K., Mesyats M.A., Fedulova E.A., Kononova S.A. New coal technologies: trends and prospects. *Ugol'*. 2022;(S12):4-10. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-4-10.
 5. Kobilov Kh. Laboratory research of coal briquette quality indicators. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1112(1):012007. DOI: 10.1088/1755-1315/1112/1/012007.
 6. Исламов С.Р. Глубокая переработка угля: критический анализ технологий // Уголь. 2024;(6):32-39. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-32-39. Islamov S.R. Deep coal processing: a critical analysis of technologies. *Ugol'*. 2024;(6):32-39. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-32-39.
 7. Наугольнова И.А. Факторы и инструменты снижения затрат на промышленных предприятиях // Перспективы науки. 2015. № 8. С. 123-127. Naugolnova I.A. Factors and instruments to reduce costs in industrial enterprises. *Perspektivy nauki*. 2015;(8):123-127. (In Russ.).
 8. Опыт внедрения систем автоматического управления технологическими процессами обогащения угля / Г.В. Иванов, А.А. Куранов, М.В. Фрицлер и др. // Уголь. 2024;(8):67-70. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-8-67-70. Ivanov G.V., Kuranov A.A., Fritsler M.V., Sulimova A.A. Experience in the implementation of automatic control systems for technological processes of coal enrichment. *Ugol'*. 2024;(8):67-70. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-8-67-70.
 9. От экономического роста к устойчивому развитию России: гипотезы, концепции, практики: монография / С.В. Беляева, А.С. Васильева, Д.В. Гавчук и др. Самара: НИЦ «ПНК», 2024. 237 с.
 10. Интеллектуальное сухое обогащение угля методом ХРТ: новая эра в горной отрасли. <https://www.vnedra.ru/tehnologii/intellektualnoe-suhoe-obogashhenie-uglya-metodom-xrt-novaya-era-v-gornoj-otrasli-27986/>.
 11. Флотация и другие методы, применяемые при обогащении угля. МашПром-Эксперт (Санкт-Петербург). <http://www.mpoltd.ru/poleznoe/364-flotatsiya-i-drugie-metody-primenyayemye-pri-obogashcheniya-uglya.htm.l>.
 12. Процесс развития технологий обогащения угля в России и за рубежом / С.А. Прокопьев, О.Л. Алексеева, Д.Ю. Савон и др. // Уголь. 2023;(11):96-101. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-96-101. Prokopyev S.A., Alekseeva O.L., Savon D.Yu., Kostyukhin Yu.Yu., Prokopyev E.S. The process of developing coal enrichment technologies in Russia and abroad. *Ugol'*. 2023;(11):96-101. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-96-101.
 13. Прокопьев С.А. Обзор гравитационных технологий обогащения угольных шламов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 458-468. DOI: 10.21285/2686-9993-2022-45-4-458-468. Prokopyev S.A. Overview of coal sludge gravity concentration technologies. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*. 2022;45(4):458-468. (In Russ.). DOI: 10.21285/2686-9993-2022-45-4-458-468.
 14. Чульдудм К.К., Куликова М.П. Разработка лабораторной установки для флотационного обогащения тувинских углей // Природные ресурсы, среда и общество. 2023;(2):64-67. DOI: 10.24412/2658-4441-2023-2-64-67. Chuldum K.K., Kulikova M.P. Development of a laboratory unit for flotation of Tuvan coals. *Prirodnye resursy, sreda i obshchestvo*. 2023;(2):64-67. (In Russ.). DOI: 10.24412/2658-4441-2023-2-64-67.
 15. Нифонтов Ю.А., Нифонтова Т.И. Перспективы переработки и использования интинских углей // Обогащение руд. 2022. № 2. С. 42-46. DOI: 10.17580/or.2022.02.07. Nifontov Yu.A., Nifontova T.I. Processing and use prospects for Inta coals. *Obogashchenie rud*. 2022;(2):42-46. (In Russ.). DOI: 10.17580/or.2022.02.07.

Authors Information

Volkodavova E.V. – Professor of the Institute of Management, Samara State University of Economics, Samara, 443090, Russian Federation, e-mail: vev.sseu@gmail.com

Berdnikova L.F. – PhD (Economics), Associate Professor, Associate Professor, of the Institute of Finance, Economics and Management, Togliatti State University, Togliatti, 445020, Russian Federation, e-mail: bleylaf@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 26.02.2026

Поступила после рецензирования: 16.03.2026

Принята к публикации: 30.03.2026

Paper info

Received February 26, 2026

Reviewed March 16, 2026

Accepted March 30, 2026