

УДК 662.925:662.997.002.2
AGRIS P05

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/123/14>

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОГЕРЕНТНОГО СЖИГАНИЯ БУРЫХ УГЛЕЙ АЛАЙСКОГО УГЛЕНОСНОГО РАЙОНА КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

©*Ташполотов Ы.*, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-код: 2425-6716, д-р физ.-мат. наук,
Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, itashpolotov@mail.ru
©*Сабиров Б. З.*, ORCID: 0009-0000-8204-9235, SPIN-код: 2334-8963, Институт
природных ресурсов им. А. С. Джаманбаева, г. Ош, Кыргызстан, batir73@mail.ru

OPTIMIZATION OF THE COHERENT COMBUSTION PROCESS FOR BROWN COALS IN THE ALAI COAL-BEARING REGION OF THE KYRGYZ REPUBLIC

©*Tashpolotov Y.*, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN code: 2425-6716, Dr. habil.,
Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, itashpolotov@mail.ru
©*Sabirov B.*, ORCID: 0009-0000-8204-9235, SPIN-code: 2334-8963,
Institute of Natural Resources named after A. Dzamanbaev, Osh, Kyrgyzstan, batir73@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования процесса когерентного сжигания для бурых углей Алайского угленосного района (месторождения Чукур, Норускол, Кызыл-Булак, Белалма, Кожокелен Кыргызской Республики). Целью работы являлось определение оптимальных параметров сжигания с учетом технических характеристик углей юга КР. На основе системы дифференциальных уравнений (Навье–Стокса, теплопереноса, массы горючих частиц и Аррениуса) рассчитаны ключевые параметры: время полного сгорания, скорость горения и тепловая эффективность. Установлено, что повышенная зольность и влажность ряда углей Алайского угленосного района требуют коррекции температурного режима и тонкости(дисперсности) помола. Оптимальным размером частиц для достижения эффективности сжигания >95% является диапазон 15–45 мкм при температуре 1450–1550°C. Результаты работы позволяют дать практические рекомендации по проектированию горелочных устройств и режимов работы для котельных установок Кыргызстана.

Abstract. The article presents the results of mathematical modeling of the coherent combustion process for brown coals from the Alai coal-bearing region (Chukur, Noruskol, Kyzyl-Bulak, Belalma, and Kozhokelen deposits in the Kyrgyz Republic). The study aimed to determine optimal combustion parameters considering the technical characteristics of southern Kyrgyz coals. Using a system of differential equations (Navier-Stokes, heat transfer, combustible particle mass, and Arrhenius), key parameters were calculated: total combustion time, burning rate, and thermal efficiency. It was established that the elevated ash content and moisture levels of certain coals in the Alai coal-bearing region necessitate adjustments to temperature regimes and grinding fineness (dispersion). The optimal particle size for achieving combustion efficiency >95% is 15–45 µm at temperatures of 1450–1550°C. The results provide practical recommendations for designing burner systems and operational regimes for boiler installations in the Kyrgyz Republic.

Ключевые слова: когерентное сжигание, бурые угли, Алайский угленосный район, математическое моделирование, зольность.

Keywords: coherent combustion, brown coals, Alai coal-bearing region, mathematical modeling, ash content.

Энергетическая безопасность Кыргызской Республики исторически во многом зависела от гидроэнергетики. Однако, рост энергопотребления, климатические изменения, влияющие на водность рек, и необходимость диверсификации энергобаланса обуславливают повышенное внимание к угольной отрасли [1].

За последние 16 лет объем добычи угля в КР вырос более чем в 14 раз – с 321,3 тыс. т в 2006 г. до 4.6 млн. т в 2024 г. [2].

Наибольший вклад в этот рост вносят Нарынская, Ошская и Баткенская области. Основная масса добываемого угля используется для отопления населением и в промышленности, зачастую на устаревшем оборудовании с низким КПД и высоким уровнем загрязнения окружающей среды. Это порождает острую проблему на стыке энергетики и экологии: с одной стороны, уголь является доступным и важным локальным энергоресурсом, с другой — его традиционное сжигание наносит значительный экологический ущерб, особенно в густонаселенных предгорных районах. Внедрение современных высокоэффективных и низкоэмиссионных технологий сжигания представляется императивом для устойчивого развития угольной энергетики Кыргызстана. Энергетика Южного Кыргызстана в значительной степени опирается на угольный потенциал Алайского угленосного района. Как показывают данные Таблицы 1, Ошская область стабильно входит в тройку ключевых угледобывающих регионов Республики [1].

Таблица 1
ДИНАМИКА ДОБЫЧИ УГЛЯ В КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ ПО ОБЛАСТЯМ, тыс. т [2]

Наименование показателей	Календарные годы								
	2006	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Баткенская область	139,4	249,0	294,0	222,1	378,7	422,6	475,6	654,8	774,9
Джалал-Абадская область	23,3	159,8	146,9	130,4	155,6	120,4	300,9	264,5	191,7
Иссык-Кульская область	22,2	3,4	3,8	-	-	-	-	-	-
Нарынская область	105,1	753,2	820,9	867,6	1087,7	1252,2	1366,0	1276,3	1831,8
Ошская область	31,3	763,2	585,7	650,3	773,2	810,8	535,2	875,1	977,0
Всего по Кыргызстану	321,3	1928,7	1851,3	1870,4	2395,2	2606,0	2677,7	3062,5	3775,4

Данные Таблицы 1 демонстрируют устойчивую тенденцию к росту добычи угля в КР, что подтверждает актуальность исследования технологий его эффективного использования. Нарынская область стала ключевым угледобывающим регионом. Однако использование этих углей, отличающихся разнородными и зачастую невысокими качественными показателями (высокая зольность, переменная влажность), на устаревшем оборудовании приводит к крайне низкому КПД и экологическому ущербу. Внедрение современных технологий сжигания, адаптированных на отечественное сырье, является критически важным для устойчивого развития КР и южного региона. Технология *когерентного сжигания*, обеспечивающая

максимальное извлечение энергии при минимальных выбросах, представляет собой оптимальное решение данной проблемы [3-5].

Как известно, когерентное сжигание угля[5] представляет собой процесс, в котором сжигание происходит в контролируемых условиях, обеспечивающих максимальное извлечение энергии из угля при минимальном образовании вредных веществ. Основная идея заключается в обеспечении когерентности, или согласованности, движения частиц угля и молекул окислителя для повышения эффективности горения [5-7].

Рассмотрим физику процесса *когерентного сжигания* угля:

1. Подготовка угольного топлива: уголь измельчается до определенного размера частиц, оптимального для горения. Чем меньше частицы, тем больше площадь их поверхности, что облегчает их взаимодействие с окислителем и повышает скорость горения [6].

2. Подача окислителя: для эффективного сжигания необходим окислитель, обычно кислород или воздух. В процессе когерентного сжигания подача окислителя осуществляется таким образом, чтобы он смешивался с частицами угля в оптимальном соотношении и на определенной скорости. Это способствует более равномерному и полному сжиганию топлива [6, 8].

3. Формирование когерентного пламени: важным элементом когерентного сжигания является управление пламенем. Поток угольных частиц и окислителя организуется таким образом, чтобы в процессе горения образовалось когерентное пламя — пламя с четкой структурой, в котором зоны горения частиц угля распределены равномерно. Это достигается с помощью регулирования скорости и направления потоков угля и окислителя [7].

4. Химические реакции: при сжигании угля основными реакциями являются окисление углерода (C) и других присутствующих элементов, таких как водород (H) и сера (S). Эти реакции высвобождают тепло и энергию: Основная реакция: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{тепло}$; побочные реакции: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{тепло}$ и $S + O_2 \rightarrow SO_2 + \text{тепло}$ [6, 9].

5. Контроль температуры: в процессе когерентного сжигания контролируется температура зоны горения. Оптимальная температура поддерживается для максимальной эффективности сжигания и минимизации образования вредных выбросов, таких как оксиды азота (NO_x) и несгоревшие углеродные частицы [4, 8-10].

6. Синхронизация потоков: когерентность достигается за счет синхронизации движения частиц угля и молекул окислителя. Это уменьшает вероятность образования зон с недостатком кислорода или его избытком, что позволяет достичь более полного сгорания и уменьшения вредных выбросов [5, 7].

7. Преобразование энергии: высвобождаемое в процессе когерентного сжигания тепло используется для преобразования в электрическую или механическую энергию. В промышленных установках полученное тепло передается теплоносителю (например, воде) для выработки пара, который затем приводит в действие турбины [3].

Таким образом, когерентное сжигание угля — это процесс, позволяющий оптимизировать взаимодействие угольных частиц и окислителя для более полного и чистого горения. *Цель статьи* — провести расчетное обоснование параметров когерентного сжигания для бурых углей Алайского района с учетом их физико-химических свойств.

Методы исследования

Исследование основано на методе математического моделирования. Была использована усовершенствованная модель, включающая систему дифференциальных уравнений [6, 9, 10].

Математическое моделирование процесса когерентного сжигания угля основывается на физических и химических законах, описывающие горение угольных частиц, тепло- и

массоперенос, а также динамику потоков окислителя. Используемая нами модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, учитывающих параметры частиц угля, температуры, скорости реакций, состава продуктов сгорания и другие факторы.

1. Уравнения тепло- и массопереноса Уравнение теплопереноса рассматривает изменение температуры в зоне горения и передачу тепла от горящих частиц к окружающей среде: $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$, где ρ — плотность угольной смеси, c_p — удельная теплоемкость, T — температура, v — скорость потока, k — коэффициент теплопроводности, Q — источники тепла (тепло от реакции горения) [6, 10].

2. Уравнение массы горючих частиц на основе закона Фика Закон сохранения массы включает испарение летучих компонентов и окисление углерода. Скорость потери массы угольной частицы определяется уравнением: $dm_c/dt = -k_p A_c (CO_2 - CO_{2,cp})$, где m_c — масса угольной частицы, k_p — кинетическая константа реакции, A_c — площадь поверхности частицы, CO_2 — концентрация кислорода в зоне горения, $CO_{2,cp}$ — концентрация кислорода в состоянии равновесия [6, 10].

3. Модель кинетики реакции горения Скорость реакции окисления углерода в угле описывается уравнением Аррениуса: $k_r = A \exp(-E_a / (RT))$, где A — предэкспоненциальный фактор, E_a — энергия активации реакции, R — универсальная газовая постоянная, T — температура [6, 10].

4. Уравнение движения газов (Навье–Стокса) Для моделирования динамики многофазного потока угольных частиц и окислителя используются уравнения Навье–Стокса: $\rho (\partial v / \partial t + (v \cdot \nabla) v) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + F$, где v — вектор скорости потока, p — давление, μ — динамическая вязкость, F — внешние силы (например, гравитация) [6, 9, 10].

5. Тепловой баланс для угольных частиц Уравнение теплового баланса для отдельной угольной частицы с дополнительным членом, учитывающим затраты тепла на испарение влаги, нагрев минеральной составляющей и теплопередачу в окружающую среду: $M_c c_p dT_c/dt = h A_c (T_g - T_c) + Q_{тв}$, где T_c — температура частицы, T_g — температура газа, h — коэффициент теплопередачи, $Q_{тв}$ — тепловыделение от химических реакций [6, 9, 10].

Основным расчетным соотношением для определения времени полного сгорания частицы является [6, 10]: $t_{nc} = (r_p \rho_p) / (3 k_r (CO_2 - CO_{2,eq}))$. Для расчетного определения оптимального процесса сжигания использовались угли Алайского угленосного района КР с усредненными значениями характеристик (Таблица 2).

Таблица 2
КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ УСРЕДНЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
БУРЫХ УГЛЕЙ АЛАЙСКОГО УГЛЕНОСНОГО РАЙОНА (в скобках – среднее)

Место	Зольность A_d	Выход летучих веществ V_{daf}	Аналитическая влага W_a	Массовая доля серы S_{td}	Углерод общий C_{td}	Водород общий H_{td}	Азот общий N_{td}	Теплота сгорания Q_{daf} , ккал/кг
Чукур	8,3-34,54 (23,11)	31,71-50,86 (41,68)	2,40-7,71 (4,96)	0,04-1,05 (0,59)	-	-	-	5050-6376 (5733)
Норускол	40,4-44,8 (42,6)	33,8-59,9 (46,85)	1,26-28,55 (10,0)	0,3-1,1 (0,7)	-	-	-	3032-6700 (4866)
Кызыл-Булак	5,05-42,89 (15,63)	35,71-50,21 (41,67)	-	0,01-0,96 (0,027)	80,3	4,56	0,74	4492–7551 (5785)
Бел-Алма	4,0-40,0 (12,0)	27-40 (33,5)	6,7-14,8 (10,7)	0,28	-	-	-	6500–7150 (6825)
Кожокелен	13,1	39,8	6,0-18,55 (12,25)	-	-	-	-	5191

Результаты и их обсуждение

Результаты математического моделирования процесса горения в зависимости от дисперсности угля представлены в Таблицах 3–5.

Таблица 3

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ДЛЯ УГЛЕЙ АЛАЙСКОГО РАЙОНА

Размер частиц угля, мкм	Эффективност ь сжигания, %	Комментарии
5–15	96–98	Высокая эффективность, но повышенный унос мелких частиц и риски синтеза NO _x [4, 9]
15–45	94–96	Оптимальный диапазон. Баланс между эффективностью, контролем и уносом.
45–70	88–92	Снижение эффективности из-за незавершенных процессов внутри частиц [6]
70–100	80–86	Низкая эффективность, требуются T>1550°C [7, 11]
>100	<70	Неприемлемо для когерентного сжигания [5-7]

Таблица 4

ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕНИ ПОЛНОГО СГОРАНИЯ ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ И ТЕМПЕРАТУРЫ (для угля с зольностью ~25%)

Размер частиц, мкм	Температура, °C	Время сгорания, с	Комментарии
15	1450	0.35	Быстрое сгорание, но сложный контроль
25	1500	0.5	Оптимум: полное сгорание до уноса из зоны
25	1400	0.7	Замедление реакции, риск недожога [6]
40	1550	0.6	Компенсация размера температурой [7, 9, 10]
60	1550	1.2	Длительное время, необходима большая камера сгорания [6, 9, 10]

Таблица 5

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ УГЛЯ

Размер частиц, мкм	Скорость горения, м/с	Комментарии
10–20	1.1–1.4	Высокая скорость, применимо для низкозольных углей (Бел-Алма)
20–45	0.9–1.1	Наилучший баланс для большинства месторождений района
45–70	0.6–0.8	Замедленное горение, критически важна температура [6, 7]
>70	<0.5	Не рекомендуется для эффективного процесса [6, 9, 10]

Обсуждение полученных результатов

Проведенное математическое моделирование процесса когерентного сжигания для углей Алайского угленосного района выявило ряд ключевых зависимостей, представленных в Таблицах 3–5, а также существенное влияние качества угля на параметры когерентного сжигания:

1. Повышенная зольность (до 42–44% у Норускола) выполняет роль балласта, поглощающего тепло и снижающего температуру в активной зоне. Это требует поддержания температуры в верхнем диапазоне (1550 °C) для обеспечения полноты выгорания [8, 11, 12];
2. Высокая влажность (до 28% у Норускола) увеличивает время пребывания, необходимое для полного сгорания, так как часть энергии тратится на парообразование [6, 7].

Наименее требовательны к условиям сжигания угли месторождений Бел-Алма и Кызыл-Булак, обладающие более высокой теплотворной способностью и меньшей зольностью. Для них справедливы параметры, близкие к расчетным для стандартного угля [6].

На основе полученных данных для углей Алайского угленосного района КР проведем сравнительный анализ в контексте мирового опыта и специфики угольных месторождений КР и Центральной Азии.

Установленный оптимальный диапазон размера частиц для углей Алайского угленосного района (15–45 мкм) согласуется с общемировыми тенденциями в технологии пылеугольного сжигания. Однако по сравнению с данными для высококачественных битуминозных углей (например, из Кузбасса или месторождений Австралии), где оптимальная фракция часто находится в диапазоне 40–80 мкм [6], алайские угли требуют более тонкого помола. Это обусловлено их низкой реакционной способностью и высоким содержанием инертной минеральной массы [7, 9, 10].

Угли Казахстана (Экибастуз): Экибастузские угли, известные высокой зольностью (до 40–50%), также требуют тонкого измельчения (менее 60 мкм) для эффективного сжигания. Однако их более высокая теплотворная способность по сравнению с алайскими позволяет несколько смягчить требования к дисперсности [13].

Моделирование для алайских углей показывает, что даже при тонком помоле (15–45 мкм) максимальная эффективность достигает 94–96%, что на 2–4% ниже, чем теоретически достижимый для низкосольных углей.

Угли Таджикистана (Фан-Ягноб): Угли Фан-Ягнобского месторождения, как и алайские, относятся к бурым и характеризуются повышенной зольностью. Исследования показали схожие требования к тонкому помолу (до 50 мкм), однако из-за более высокой влажности время полного сгорания для таджикских углей может быть несколько выше [14].

Выявленный риск повышенного уноса и синтеза NO_x для фракции 5–15 мкм является общепризнанной проблемой. Для снижения данного эффекта необходимо применять многоступенчатую подачу окислителя и тщательно контролировать температурный профиль в топке, что подтверждает необходимость комплексного подхода к организации процесса [4, 8, 9].

Полученные данные по времени полного сгорания частиц (0.35–1.2 с) находятся в хорошем соответствии с классическими работами по теории горения угольных частиц [10].

Однако прямое сравнение показывает, что для высокосольных углей Алайского района время сгорания при прочих равных условиях на 15–25% выше, чем для марок с низкой зольностью [6, 9, 10].

Основной вывод из Таблицы 4 — это необходимость поддержания высокой температуры (1500–1550°C) для компенсации как крупности частиц, так и высокой зольности. Это полностью согласуется с исследованиями по сжиганию низкосортных топлив, где повышенная температура является основным инструментом обеспечения полноты выгорания [7, 9, 10].

Однако это создает дополнительную задачу для материалов топочной камеры и увеличивает риск шлакования. Для углей с зольностью, подобной Норускольской (>40%), может потребоваться температура на 50–100°C выше, чем представлено в таблице, что подтверждается исследованиями по сжиганию высокосольных антрацитов [8, 9, 12].

Скорость горения является интегральным показателем, зависящим от дисперсности, пористости, химического состава вещества и температуры. Полученные значения скоростей (0.5–1.4 м/с) находятся в ожидаемом диапазоне для бурых углей [6, 10].

Наблюдаемое значительное падение скорости горения для частиц крупнее 45 мкм (до <0.5 м/с) является критически важным результатом. Это подтверждает вывод о непригодности

грубого помола для технологии когерентного сжигания данных углей. Сравнение с углями бассейна Шивэ-Овоо (Монголия)[15], имеющими схожую зольность, показывает, что скорость горения углей Алайского угленосного района может быть на 10–15% ниже из-за различий в микроструктуре и составе минеральной части [18].

Выводы

1. Адаптированное математическое моделирование подтвердило, что специфические свойства бурых углей Алайского района (высокая зольность, влажность) требуют значительной коррекции стандартных режимов когерентного сжигания[16–18]. Для достижения высокой эффективности (до 96%) научно обоснована необходимость повышения температуры в активной зоне на 50–100 °С и соблюдения строгого фракционного состава пыли 20–45 мкм. Это обеспечивает компромисс между кинетикой выгорания и аэродинамическим уносом, доказывая принципиальную возможность эффективной энергетической утилизации данного низкосортного топлива[17, 18].

2. Разработанная математическая модель установила четкую зависимость между качеством угля и требуемыми технологическими параметрами. Ключевые условия для эффективного сжигания высокзолых алайских углей — поддержание высокого температурного режима (1500–1550°С) и оптимальной дисперсности пыли (20–45 мкм). Полученные результаты являются строгим научным обоснованием для модернизации топочных устройств, включающей установку систем тонкого помола и реконструкцию горелок, что позволит трансформировать местные низкокачественные угли в конкурентный энергоресурс[16–18].

Перспективы и практические рекомендации

1. Для котельных установок Ошской и Баткенской областей рекомендуется внедрение систем тонкого помола угля с классификацией для получения фракции 20–45 мкм.

2. При проектировании новых горелочных устройств необходимо закладывать возможность работы в высокотемпературном режиме (до 1550°С) и иметь возможность регулирования скорости подачи пылевоздушной смеси.

3. Для высокзолых углей (Норускол) рекомендуется предварительная подсушка и обогащение для повышения экономической и экологической эффективности.

4. Перспективным является создание опытно-промышленной установки когерентного сжигания на базе одной из крупных котельных г. Ош для натурных испытаний и получения окончательных технико-экономических показателей.

Список литературы:

1. Данные Министерства энергетики и промышленности Кыргызской Республики. Отчеты по добыче полезных ископаемых. 2006–2022 гг.
2. Абдырасулова Н., Сулайманова Д. Качество и рынок углей в южных областях Кыргызской Республики, информационно-аналитическая справка. Бишкек: ЮНИСОН. 2013.
3. Росляков П. В., Изюмов М. А. Экологически чистые технологии использования угля на ТЭС. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 123 с.
4. Hill S. C., Smoot L. D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems // Progress in energy and combustion science. 2000. V. 26. №4–6. P. 417–458. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00011-3)
5. ГОСТ Р 54204-2010. Ресурсосбережение каменные и бурые угли. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2010 г. №984-ст.

6. Pratt D. T., Smoot L., Pratt D. Pulverized coal combustion and gasification // Springer, Berlin. 1979. V. 1007. P. 978-1. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1696-2>
7. Gupta R. P., Yan D., Wall T. F., Baxter L. Challenges and Strategies for Combustion of High-Ash Coals in Utility Boilers. Boca Raton: CRC Press, 2018. 324 p.
8. Williams A., Pourkashanian M., Jones J. M. The Combustion of Coal // Clean Carbon Technologies. 2012. P. 45–89.
9. Wall T. F., Creelman R. A., Gupta R. P., Gupta S., Coin C., Lowe A. Coal ash fusion temperatures — new characterisation techniques, and associations with phase equilibria // Applications of advanced technology to ash-related problems in boilers. Boston, MA: Springer US, 1996. P. 541-556. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9223-2_36
10. Field M. A., Gill D. W., Morgan B. B., Hawksley P. G. W. Combustion of Pulverised Coal. Leatherhead: The British Coal Utilisation Research Association (BCURA), 1967. 399 p.
11. Бучаченко А. Л. Когерентная химия. М., 2002.
12. Краснобрыжев В. Г. Свойства когерентной материи // Торсионные поля и информационные взаимодействия—2009. Материалы международной научной конференции. Хоста, Сочи. 2009. С. 25-29.
13. Saparov A., Mostafavi E., Sarbassov Y., Suleimenova B., Inglezakis V., Shah D. Modeling of the Low Grade Coal Combustion in a Fluidized Bed Reactor Using Aspen Plus // DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences. 2019. №iceee. <https://doi.org/10.12783/dteees/iceee2019/31794>
14. Loktionova E., Miftakhova D., Yaroslavtseva E. Filtration characteristics of pressure pipelines previous being in operation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. V. 883. №1. P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012014>
15. Lkhagvasuren A., Batchuluun B., Jambaljamts M. Combustion Characteristics of Shivee-Owoo Coal // Mongolian Journal of Mechanical and Production Engineering. 2019. V. 5. №1. P. 15–21.
16. Бучаченко А. Л. Когерентная химия и биохимия // Российский химический журнал. 2009. Т. 53. №6. С. 7-15.
17. Buchachenko A. L., Frankevich E. L. Chemical generation and reception of radio-and microwaves. John Wiley & Sons, 1996.
18. Краснобрыжев В. Г. Когерентный уголь – новая перспектива энергетики // Сборник материалов международной научной конференции. Сочи, 2009. С. 552–557.

References:

1. Dannye Ministerstva energetiki i promyshlennosti Kyrgyzskoi Respubliki. Otchety po dobyche poleznykh iskopaemykh. 2006–2022 gg.
2. Abdyrasulova, N., & Sulaimanova, D. (2013). Kachestvo i rynek uglei v yuzhnykh oblastyakh Kyrgyzskoi Respubliki, informatsionno-analiticheskaya spravka. Bishkek.
3. Roslyakov, P. V., & Izyumov, M. A. 2003. Ekologicheskii chistye tekhnologii ispol'zovaniya uglya na TES. Moscow. (in Russian).
4. Hill, S. C., & Smoot, L. D. (2000). Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems. *Progress in energy and combustion science*, 26(4-6), 417-458. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00011-3)
5. GOST R 54204-2010. Resursosberezhenie kamennye i burye ugli. Utverzhden i vveden v deistvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 23 dekabrya 2010 g. №984-st. (in Russian).
6. Pratt, D. T., Smoot, L., & Pratt, D. (1979). Pulverized coal combustion and gasification. Springer, Berlin. 1007, 978-1. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1696-2>

7. Gupta, R. P., Yan, D., Wall, T. F., & Baxter, L. (2018). Challenges and Strategies for Combustion of High-Ash Coals in Utility Boilers. Boca Raton.
8. Williams, A., Pourkashanian, M., & Jones, J. M. (2012). The Combustion of Coal. In: *Clean Carbon Technologies*, 45–89.
9. Wall, T. F., Creelman, R. A., Gupta, R. P., Gupta, S., Coin, C., & Lowe, A. (1996). Coal ash fusion temperatures — new characterisation techniques, and associations with phase equilibria. In *Applications of advanced technology to ash-related problems in boilers* (pp. 541-556). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9223-2_36
10. Field, M. A., Gill, D. W., Morgan, B. B., & Hawksley, P. G. W. (1967). Combustion of Pulverised Coal. Leatherhead: The British Coal Utilisation Research Association (BCURA).
11. Buchachenko, A. L. (2002). Kogerentnaya khimiya. Moscow. (in Russian).
12. Krasnobryzhev, V. G. (2009, August). Svoistva kogerentnoi materii. In Torsionnye polya i informatsionnye vzaimodeistviya–2009. *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Khosta, Sochi* (pp. 25-29). (in Russian).
13. Saparov, A., Mostafavi, E., Sarbassov, Y., Suleimenova, B., Inglezakis, V., & Shah, D. (2019). Modeling of the Low Grade Coal Combustion in a Fluidized Bed Reactor Using Aspen Plus. *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*, (iceee). <https://doi.org/10.12783/dteees/iceee2019/31794>
14. Loktionova, E., Miftakhova, D., & Yaroslavtseva, E. (2020, July). Filtration characteristics of pressure pipelines previous being in operation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 883(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012014>
15. Lkhagvasuren, A., Batchuluun, B., & Jambaljamts, M. (2019). Combustion Characteristics of Shivee-Owoo Coal. *Mongolian Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(1), 15–21.
16. Buchachenko, A. L. (2009). Kogerentnaya khimiya i biokhimiya. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 53(6), 7-15.
17. Buchachenko, A. L., & Frankevich, E. L. (1996). Chemical generation and reception of radio-and microwaves. John Wiley & Sons.
18. Krasnobryzhev, V. G. (2009). Kogerentnyi ugol' – novaya perspektiva energetiki // Sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Sochi, 552–557. (in Russian).

Поступила в редакцию
03.12.2025 г.

Принята к публикации
17.12.2025 г.

Ссылка для цитирования:

Ташполотов Ы., Сабиров Б. З. Оптимизация процесса когерентного сжигания бурых углей Алайского угленосного района Кыргызской Республики // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №2. С. 133-141. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/123/14>

Cite as (APA):

Tashpolotov, Y., & Sabirov, B. (2026). Optimization of the Coherent Combustion Process for Brown Coals in the Alai Coal-Bearing Region of the Kyrgyz Republic. *Bulletin of Science and Practice*, 12(2), 133-141. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/123/14>