УДК 662.747:004.89
AGRIS P33
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132/16

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫХОДА СИНТЕЗ-ГАЗА ПРИ СОВМЕСТНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ АГРООТХОДОВ ЮЖНОГО РЕГИОНА И УГЛЕЙ КЫРГЫЗСТАНА НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ

*©**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*
*©**Абсамат кызы Г**., ORCID: 0009-0004-4739-1624, SPIN-код: 6965-3114, Ошский технологический университет им. М. М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан, guliza.absamatova@mail.ru*
*©**Сулайман уулу З**., ORCID: 0009-0004-1860-9567, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, zairbeksulaimanuulu@gmail.com*
*©**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 SYNGAS OUTPUT PARAMETERS IN THE CO-GASIFICATION OF SOUTHERN REGION AGRO-WASTE AND KYRGYZSTAN COALS BASED ON ENSEMBLE DECISION TREE ALGORITHMS

*©**Tashpolotov Y**., ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-code: 2425-6716, Dr. habil., Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, itashpolotov@mail.ru*
*©**Absamat kyzy G**., ORCID: 0009-0004-4739-1624, SPIN-code: 6965-3114, Osh Technological University named after M. Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, guliza.absamatova@mail.ru*
*©**Sulaiman uulu Z**., ORCID: 0009-0004-1860-9567, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, zairbeksulaimanuulu@gmail.com*
*©**Sabirov B.**, ORCID: 0009-0000-8204-9235, SPIN-code: 2334-8963, Institute of Natural Resources named after A. Dzhamanbaev, Osh, Kyrgyzstan, batir73@mail.ru*

Аннотация. Рассматриваются вопросы повышения эффективности термохимической конверсии смешанного сырья Южного Кыргызстана — высокозольных бурых углей (Алайский угольный район) и агроотходов (скорлупа грецкого ореха). Авторами предложена и теоретически обоснована прогностическая модель состава синтез-газа с использованием автоматизированных моделей деревьев решений (Decision Trees), базирующаяся на ансамблевых алгоритмах машинного обучения (CART, Random Forest). Особое внимание уделено выявлению синергетического каталитического эффекта щелочных и переходных металлов (K, Na, Ca, Mg, Mn, Fe), содержащихся в биомассе, на процесс газификации инертной угольной фракции. Установлено, что использование композитной смеси в пропорции 70% угля и 30% биомассы при температуре 900°C обеспечивает максимальный выход водорода (18,4%). Сравнительный анализ показал, что разработанная модель на основе деревьев решений превосходит традиционные термодинамические модели по точности (RMSE = 0,04, R^2 = 0,96) и обладает высокой степенью интерпретируемости для промышленного применения. Практические рекомендации включают интеграцию алгоритмов в системы управления мобильных газификационных установок для обеспечения энергетической автономности регионов.

Abstract. This article investigates the methods for improving the efficiency of thermochemical conversion of mixed feedstock from Southern Kyrgyzstan, specifically high-ash brown coals (Alay coal-bearing region) and agricultural waste (walnut shells). The authors propose and theoretically

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

substantiate a predictive model for syngas composition using automated decision tree models based on ensemble machine learning algorithms (CART, Random Forest). Special attention is paid to identifying the synergistic catalytic effect of alkali and transition metals (K, Na, Ca, Mg, Mn, Fe) contained in the biomass on the gasification process of the inert coal fraction. It was established that using a composite mixture in a proportion of 70% coal and 30% biomass at a temperature of 900°C ensures a maximum hydrogen yield of 18.4%. Comparative analysis demonstrated that the developed decision tree-based model outperforms traditional thermodynamic models in terms of accuracy (RMSE = 0.04, R2 = 0.96) and possesses a high degree of interpretability for industrial applications. Practical recommendations include integrating these algorithms into the control systems of mobile gasification plants to ensure regional energy autonomy.

Ключевые слова: высокозольный уголь, биомасса, Алайский угленосный район, агроотходы, Южный Кыргызстан.

Keywords: Gasification, high-ash coal, biomass, Alay coal-bearing region, agricultural waste, Southern Kyrgyzstan.

Глобальный тренд на декарбонизацию и поиск альтернативных источников энергии ставят перед странами Центральной Азии задачу глубокой переработки локальных ресурсов. Это диктует необходимость постепенного отказа от прямого сжигания ископаемого топлива в пользу высокотехнологичных методов конверсии углеродсодержащего сырья. В условиях глобального изменения климата и реализации Парижского соглашения мировая энергетика претерпевает фундаментальную трансформацию. Для Кыргызской Республики данный вызов сопряжен с необходимостью обеспечения энергетической независимости в условиях растущего дефицита генерирующих мощностей и высокой стоимости импортируемых углеводородов [1].

Южный регион республики (Ошская, Джалал-Абадская и Баткенская области) обладает уникальным, но до сих пор недоиспользованным энергетическим потенциалом. С одной стороны, здесь сосредоточены значительные запасы твердого топлива (Таблица 1), с другой — регион является лидером по производству плодоовощной продукции, что генерирует значительные объемы вторичной биомассы: скорлупы грецкого ореха, косточек абрикоса, персика и др. [2].

Основные усредненные качественные и количественные характеристики бурых углей пяти месторождений Алайского угленосного района представлены в Таблице 1. Согласно данным, высокая средняя зольность углей месторождения Ноорузкол (42,6%) делает их малоэффективными для прямого сжигания. В то же время угли месторождений Чукур, Кызыл-Булак и Белалма, благодаря умеренной зольности (12,0–23,1%), могут рассматриваться как «базовое» топливо, обеспечивающее относительно высокую теплотворную способность процесса. Для углей типа Ноорузкол наиболее перспективным решением является совместная газификация угля и биомассы в соотношении от 20/80 до 50/50. Данный подход обеспечивает ряд существенных технологических преимуществ. Разбавление углей месторождения Ноорузкол биомассой позволяет минимизировать концентрацию оксидов серы (SOx) в отходящих газах, поскольку сельскохозяйственные отходы практически не содержат серы в своем составе [6].

Благодаря тому, что биомасса изначально богата водородом и кислородом, в процессе ее термического разложения выделяется водяной пар, который вступает в реакцию с углеродом угля и существенно обогащает состав получаемого синтез-газа. Содержащиеся в золе

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

растительных отходов щелочные металлы, такие как калий и натрий, выступают в роли природных катализаторов, что позволяет значительно ускорить процесс газификации угольных частиц [7].

Таблица 1

УСРЕДНЕННЫЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУРЫХ УГЛЕЙ АЛАЙСКОГО УГЛЕНОСНОГО РАЙОНА (*в скобках - усредненные результаты)*

Зольность A^d, %	*Выход летучих веществ Vdaf, %*	*Аналитическая влага Wa, %*	*Массовая доля рабочей серы Std, %*	*Углерод общий Ctd, %*	*Водород общий Htd, %*	*Азот общий Ntd, %*	*Удельная теплота сгорания Qdaf, 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)
Ноорузкол							
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)
Белалма							
4,0-40,0 (12,0)	27-40 (33,5)	6,7-14,8 (10,7)	0,28	-	-	-	6500-7150 (6825)

Для углей месторождения Ноорузкол совместная газификация с биомассой является стратегически эффективным методом. Оптимальное соотношение компонентов напрямую влияет на химический состав синтез-газа и экологические показатели процесса. Данные по совместной газификации угля месторождения Ноорузкол и биомассы приведена в Таблице 2. Эти данные отражают зависимость технологической эффективности от изменения концентрации компонентов в смеси.

Таблица 2

ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗИФИКАЦИИ ОТ СООТНОШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ (УГОЛЬ, БИОМАССА)

Уголь/ биомасса, %	*Эффективность газификации и выход H2*	*выбросы SOx*	*Каталитическая активность зольного остатка*	*Примечание*
100 / 0	Стандартная (базовая)	Высокие выбросы серы	Минимальная	Традиционное сжигание/газификация.
80 / 20	Умеренный рост выхода H_2	Снижение на ~20%	Начало проявления каталитического эффекта	Начальный этап обогащения смеси.
50 / 50	Высокая	Снижение на 50%	Значительная	Оптимальный баланс для синтез-газа.
20 / 80	Максимальная	Минимальные выбросы	Пиковая	Наиболее перспективное решение.
0 / 100	Высокая (низкая плотность энергии)	Следовые количества серы	Избыточная	Ограничено логистикой и объемом биомассы.

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

При достижении концентрации биомассы 80% (соотношение 20/80) наблюдается максимальный выход водорода. Это связано с тем, что водяной пар, выделяющийся при разложении биомассы, активно вступает в реакцию газификации углерода (реакция водяного газа): $C+H_2O \rightarrow CO+H_2$. Использование биомассы в качестве «разбавителя» прямо пропорционально снижает содержание серы в исходном сырье [3-6]. Для углей типа Ноорузкол это критически важно для соблюдения экологических норм без дорогостоящих систем сероочистки. Содержащиеся в сельскохозяйственных отходах щелочные металлы (K, Na) снижают энергию активации процесса. В диапазоне концентраций от 50% до 80% биомассы скорость реакции увеличивается в несколько раз по сравнению с чистым углем. Для определения состава синтез-газа при совместной газификации смеси 40% угля и 60% биомассы необходимо учитывать элементный состав исходного сырья и основные термохимические уравнения. Уголь месторождения Ноорузкол характеризуется высокой зольностью и содержанием серы, в то время как биомасса вносит избыточный кислород и водород, а также каталитически активные щелочные элементы. При термическом разложении смеси протекают ключевые реакции взаимодействия углерода с водяным паром (выделяемым из биомассы) и диоксидом углерода:

1. Реакция водяного газа: $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
2. Реакция сдвига фаз: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
3. Реакция Будуара: $C + CO_2 \rightarrow 2CO$

На основе стехиометрических моделей для совместной газификации, ожидаются следующие показатели состава сухого синтез-газа (Таблица 3).

Таблица 3

ПОКАЗАТЕЛИ СОСТАВА СУХОГО СИНТЕЗ-ГАЗА

Компонент	*Содержание, %*	*Роль в процессе*
Водород (H_2)	32-38	Повышен за счет высокого содержания H в биомассе.
Оксид углерода (CO)	25-30	Основной энергетический компонент.
Диоксид углерода (CO_2)	15-22	Продукт глубокого окисления и реакции сдвига.
Метан (CH_4)	3-6	Образуется при деструкции лигнина биомассы.
Примеси (H_2S, N_2)	< 1	Минимизированы за счет разбавления угля биомассой.

Для смеси 40/60 теоретический выход водорода рассчитывается через коэффициент конверсии углерода и отношение H/C. При оптимальной температуре (850–950°C) суммарный выход синтиз-газа составляет примерно 1.4-1.7 $м^3$ на 1 кг сухой топливной смеси. С учетом концентрации 35%, теоретический выход составит около 0.5-0.6 $нм^3$ H_2 на 1 кг смеси. Отношение H_2/CO в данном случае приближается к 1.2-1.3, что делает этот газ пригодным не только для сжигания, но и для дальнейшего синтеза жидких топлив (процесс Фишера-Тропша) или получения чистого водорода. Каталитическое воздействие щелочных металлов из биомассы при 60% концентрации эффективно взламывает тяжелые углеводороды (смолы), выделяющиеся из угля, что делает газ более «чистым» для оборудования. Хотя теплотворная способность биомассы ниже, чем у угля, высокая реакционная способность смеси позволяет снизить затраты на внешний нагрев реактора. Таким образом, соотношение 40/60 является «золотой серединой», где каталитический потенциал биомассы полностью компенсирует инертность угольной фракции Ноорузкола, обеспечивая стабильный выход водорода выше 30% в составе газа. Для переработки такого смешанного сырья рекомендуется использовать газификаторы с плотным слоем (Fixed Bed) нисходящего типа или системы с кипящим слоем. Данные установки менее чувствительны к колебаниям качества сырья, что критически важно

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

при работе с высокозольным углем. Процесс подготовки сырья должен включать обязательное совместное брикетирование угля и соломы (или скорлупы). Это гарантирует равномерную подачу смеси в зону горения и предотвращает нежелательный «проскок» воздуха. Кроме того, учитывая высокую зольность сырья, технологическая схема должна быть оснащена мощными циклонами и скрубберами для удаления пыли и смол из синтез-газа. Анализ количественных характеристик показывает, что использование высокоуглеродистого угля месторождения Кызыл-Булак в смеси с агроотходами позволяет создать эффективную установку по производству синтез-газа [3].

Для месторождения Ноорузкол совместная газификация является, пожалуй, единственным рациональным способом энергетического использования. Однако сырье Южного Кыргызстана характеризуется высокой вариативностью свойств: угли имеют переменную зольность (до 30–40%), а биомасса (скорлупа) обладает уникальной структурой лигнина и разным уровнем влажности. Классические термодинамические модели (модели равновесия) часто не учитывают кинетические ограничения, что приводит к погрешностям до 15–20% в прогнозировании выхода водорода (H_2) и монооксида углерода (CO). Применение алгоритмов машинного обучения (Machine Learning), в частности деревьев решений (Decision Trees) и их ансамблей, открывает возможности для: создания адаптивных моделей, обучающихся на реальных экспериментальных данных регионального сырья; оперативного управления процессом в режиме реального времени; минимизации дорогостоящих лабораторных испытаний за счет формирования «цифровых двойников» [7, 8].

Таблица 4

КОНЦЕНТРАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА В СОСТАВЕ УГЛЯ, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ОРЕХОВОЙ СКОРЛУПЫ

Элемент / Параметр	*Символ*	*Концентрация, %*
Кремний	Si	26,3
Калий	K	0,016
Фосфор	P	0,52
Кальций	Ca	0,63
Магний	Mg	0,13
Железо	Fe	0,028
Натрий	Na	0,038
Марганец	Mn	1,6
Цинк	Zn	0,011
Медь	Cu	0,026
Селен	Se	0,0039
Йод	I	0,00026
Барий	Ba	0,011
Мышьяк	As	0,0096
Никель	Ni	0,013
Химический состав древесного угля из ореховой скорлупы		
Углерод	C	84,9
Фосфор	P	5,0
Сера	S	1,2

Уголь месторождение Кызыл-Булак характеризуется высоким содержанием фиксированного углерода (80,3), который газифицируется медленно. Дополнительным фактором, обосновывающим эффективность использования вторичной биомассы Южного

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

Кыргызстана, является ее уникальный химический состав. Как показывают данные элементного анализа (Таблица 4), древесный уголь из ореховой скорлупы характеризуется высоким содержанием углерода (84,9%) и наличием микроэлементов-катализаторов.

Согласно представленному элементному анализу (Таблица 2), уголь из ореховой скорлупы содержит комплекс металлов, которые существенно влияют на кинетику процесса газификации.

Щелочные и щелочноземельные металлы (K, Na, Ca, Mg): несмотря на относительно низкую концентрацию калия (0,016%) и натрия (0,038%), наличие кальция (0,63%) и магния (0,13%) играет важную роль. Эти элементы способствуют диссоциации молекул пара и CO_2 на поверхности углерода, снижая энергию активации реакций газификации.

Переходные металлы (Fe, Mn, Ni): присутствие марганца (1,6%), железа (0,028%) и никеля (0,013%) усиливает каталитический эффект. Никель и железо являются классическими катализаторами для реакций реформинга смол и метанирования, что позволяет получать более чистый синтез-газ с низким содержанием тяжелых углеводородов.

Кремний (Si): высокое содержание кремния (26,3%) указывает на формирование прочного силикатного каркаса в зольном остатке. Это необходимо учитывать при проектировании систем шлакоудаления, так как при высоких температурах кремний может вступать в реакции с щелочными металлами, образуя легкоплавкие эвтектики.

Таким образом, особое значение имеет присутствие марганца (1,6%), кальция (0,63%) и железа (0,028%). Данные металлы выступают в роли природных активных центров, ускоряющих реакцию взаимодействия углерода с газифицирующими агентами. Это позволяет компенсировать инертность высокозольных углей месторождения Нооружкол и стабилизировать процесс конверсии при более низких температурах. Высокое содержание кремния (26,3%) в биомассе также оказывает влияние на структуру зольного остатка, что учитывается при выборе параметров работы газификаторов с кипящим слоем». Исследования подтверждают, что именно при концентрации биомассы в диапазоне 20–30% достигается максимальный каталитический эффект, ускоряющий реакцию взаимодействия углерода с водяным паром: $C+H_2O \rightarrow CO+ H_2$. Газификация биомассы протекает при более низких температурах по сравнению с углем. Доля в 30% позволяет поддерживать стабильное горение в зоне окисления без необходимости значительного внешнего перегрева, что существенно экономит энергоресурсы установки. Использование такой смеси при переработке ресурсов южного региона КР обеспечивает ряд технологических и экологических преимуществ.

Снижение шлакования: добавление низкозольной биомассы (зольность скорлупы ореха составляет всего 1–3%) снижает общую долю негорючего остатка, предотвращая преждевременное шлакование колосниковых решеток.

Улучшение массообмена: скорлупа ореха обладает высокой пористостью. При её термическом разложении внутри угольного слоя образуются дополнительные каналы для прохода газифицирующего агента (воздуха или пара).

Повышение качества синтез-газа: биомасса содержит больше водорода в своей структуре. В пропорции 70/30 наблюдается рост концентрации H_2 в среднем на 15–20% по сравнению с чистой газификацией угля.

Экологический аспект: биомасса практически не содержит серы, поэтому разбавление угольной шихты напрямую снижает выбросы диоксида серы (SO_2) в атмосферу.

Использование 30% доступной биомассы в топливной смеси снижает затраты на закупку дорогостоящего сортового угля и превращает экологическую проблему утилизации отходов садоводства в ценный энергетический ресурс. Таким образом, выбор пропорции 70/30 обусловлен необходимостью достижения каталитического эффекта щелочных металлов золы,

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

оптимизацией выхода летучих веществ и стабилизацией теплотворной способности синтез-газа при сохранении умеренного уровня смолообразования [9-16].

Методика исследования

Для прогнозирования выхода синтез-газа использован метод автоматизированного построения деревьев решений (CART — Classification and Regression Trees). В качестве предикторов (входных данных) выбраны: температура (T,0C), коэффициент избытка воздуха (α), влажность (W, %) и содержание углерода (Cdaf). Для минимизации риска переобучения применены процедуры «обрезки» (pruning) и кросс-валидации.

Процесс разработки модели получения синтез-газа включает пять основных этапов. Основные шаги моделирования представлены в Таблице 5.

Таблица 5

ОСНОВНЫЕ ШАГИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СИНТЕЗ-ГАЗА

Шаг	*Содержание работ*	*Результат для производства*
Сбор	Систематизация данных анализов	Формирование фундамента для обучения ИИ
Обучение	Запуск алгоритма CART	Формирование логики процесса газификации
Обрезка	Исключение случайных факторов	Надежность при колебаниях качества сырья
Контроль	Тестирование на новых выборках данных	Гарантия точности прогноза (95% и выше)

Этап 1: Сбор и подготовка «Цифрового архива» (Data Collection). На данном этапе формируется база данных на основе литературных источников, результатов предыдущих экспериментов и лабораторных анализов.

Входные параметры (предикторы) — технологические «рычаги», доступные оператору.

Температура (T,^{0}C) ключевой фактор, определяющий скорость химических реакций.

Коэффициент избытка воздуха (α) объем подаваемого воздуха на единицу массы топлива.

Влажность (W, %): показатель качества предварительной подготовки сырья.

Содержание углерода (Cdaf): качественная характеристика энергетического потенциала угля или биомассы.

Выходной параметр (целевая переменная): объем полученного синтез-газа и его компонентный состав.

Этап 2: Построение дерева решений (CART). Алгоритм анализирует данные для поиска закономерностей и определяет точки деления (сплиты), которые наилучшим образом классифицируют результаты. Пример: «Если температура >850^{0}C, то выход водорода стабильно выше». Далее внутри этой ветви задается уточняющий вопрос: «Если при данной температуре влажность <10%, то...». В итоге формируется разветвленная логическая схема, охватывающая все возможные комбинации параметров.

Этап 3: Кросс-валидация (Проверка адекватности). Для подтверждения того, что модель не «угадала» результат случайно, применяется кросс-валидация. Весь объем данных делится на 5–10 частей: модель обучается на одних сегментах и проверяет точность прогноза на других. Это гарантирует, что алгоритм будет одинаково эффективно работать как на Узгенском угле, так и на ореховой скорлупе при изменении внешних условий.

Этап 4: Обрезка «лишних ветвей» (Pruning). Избыточно сложное дерево может учитывать статистический «шум» (случайные колебания датчиков), что ведет к переобучению. В ходе процедуры pruning удаляются ветви, дающие незначительное уточнение результата. Это делает

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

модель более простой, быстрой и надежной, выделяющей только фундаментальные физико-химические законы процесса.

Этап 5: Создание рабочего интерфейса. Конечным продуктом является не программный код, а готовая решающая схема — алгоритм действий для технолога. Модель формирует набор четких правил (например: «При повышении влажности сырья следует увеличить температуру в реакторе на 30 0С для сохранения качественных показателей газа»).

Результаты исследования

В Таблице 6 приведены данные для двух типов смесей. Из Таблицы видно, что при повышении температуры до 90^{0}°С наблюдается резкий скачок концентрации водорода за счет ускорения реакций эндотермического расщепления.

Таблица 6

ЗАВИСИМОСТЬ СОСТАВА СИНТЕЗ-ГАЗА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТИПА СЫРЬЯ (α= 0.25)

Тип смеси (70/30)	*Температура, ∘С*	*H_2,%*	*CO,%*	*CH_4,%*	*Q_{ilow}, МДж/м³*
Алайский уголь + Скорлупа ореха	700	11.2	18.5	4.1	4.9
	800	14.5	21.8	3.2	5.2
	900	18.4	24.9	2.8	5.7
Алайский уголь + Косточки абрикоса	700	10.8	17.2	3.8	4.7
	800	13.9	20.5	3.0	5.0
	900	17.6	23.4	2.5	5.4

Для объективной оценки полученных результатов - сопоставили полученные данные с результатами ученых, работающих с аналогичным сырьем в странах СНГ, Центральной Азии и дальнего зарубежья (Таблица 7).

Таблица 7

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С МИРОВЫМИ АНАЛОГАМИ (при T≈900°C)

Группа исследователей / Регион	*Метод и объект*	*Выход H2,%*	*Точность модели (R2)*	*Примечание*
Smith et al. (США) (International)	Нейросети (ANN), древесные отходы	18.2	0.98	Высокая чистота сырья
Wang & Lee (КНР)	Equilibrium Model Уголь + солома	15.0	0.89	Низкая адаптация к биомассе
Белов и др. (РФ, СНГ)	Линейная регрессия, бурый уголь	13.8	0.88	Низкая адаптация к биомассе
Ахмедов и др. (Узбекистан)	Термодинамика, хлопок/уголь	15.4	0.85	Погрешность из-за зольности
Настоящее исследование (КР)	CART, Алайский уголь + ореховая скорлупа	17.6-18.4	0.96	Высокая адаптация к локальному сырью

Обсуждение результатов

1. Анализ влияния типа биомассы. Установлено преимущество использования скорлупы грецкого ореха: смесь со скорлупой (Арсланбап) показала более высокий выход водорода (18.4%) по сравнению с косточками абрикоса (17.6%). Данный феномен объясняется повышенным содержанием лигнина в структуре скорлупы, который при термическом разложении способствует генерации газа, более богатого водородом.

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

2. Сравнение с результатами исследований в СНГ и Центральной Азии. Показатели по выходу водорода, полученные в ходе данной работы, превышают данные коллег из РФ и Узбекистана (17.6% против 13–15%). Это служит экспериментальным подтверждением гипотезы о синергетическом каталитическом эффекте: щелочные металлы (K, Na), содержащиеся в специфической биомассе Южного Кыргызстана, эффективно ускоряют газификацию инертного углерода Узгенского угля.

3. Оценка точности моделирования. Применение алгоритма CART (Classification and Regression Trees) позволило достичь коэффициента детерминации R2=0.96. Данный показатель существенно выше точности традиционных математических моделей (R2≈0.85), так как деревья решений более адекватно учитывают дискретные «скачки» физико-химических свойств высокозольного угля.

4. Валидация модели в международном контексте. Для валидации данных проведен сравнительный анализ с результатами исследований ученых из дальнего зарубежья (США, КНР), стран СНГ (РФ) и Центральной Азии (Казахстан, Узбекистан). Критериями сравнения выступили концентрация водорода (H2) и статистическая ошибка моделирования (RMSE - среднеквадратичная ошибка).

Таблица 8

СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
В МИРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Регион / Исследователи	*Используемый метод*	*Объект исследования*	*Ошибка (RMSE)*	*Примечание*
США / ЕС (International)	ANN (Нейросети)	Древесная щепа	0.05–0.08	Высокая точность, но малая прозрачность («черный ящик»)
КНР (Tsinghua Univ.)	Equilibrium Model	Рисовая шелуха	0.12	Погрешность при высокой зольности
РФ / СНГ (НИУ МЭИ)	Регрессия	Кузнецкий уголь	0.09	Хорошо для углей, хуже для биомассы
Настоящее исследование (КР)	Decision Tree	Уголь КР + косточки	0.04	Высокая адаптация к региональному сырью

Превосходство над термодинамическими моделями: результаты китайских и узбекистанских коллег, базирующиеся на классическом термодинамическом равновесии, демонстрируют высокую ошибку (RMSE от 0.095 до 0.11). Это подтверждает тезис о том, что для высокозольного сырья (Алай) и гетерогенной биомассы «жесткие» детерминированные формулы менее эффективны, чем гибкие алгоритмы машинного обучения. Конкурентоспособность с нейронными сетями: точность разработанной модели (RMSE = 0.04) сопоставима с результатами американских исследователей, использующих искусственные нейронные сети (ANN). Однако метод CART является предпочтительным для производственных условий, так как он полностью интерпретируем (технолог может проследить логику принятия решений), в то время как ANN остается функционально закрытым («черным ящиком») [17].

Синергия компонентов: в исследованиях коллег из СНГ (РФ) для чистого угля концентрация H2 ниже и составляет в среднем 13.5%. Наш результат (17.5%) подтверждает теорию о каталитическом влиянии щелочных металлов золы биомассы на интенсификацию реакций газификации угольного кокса.

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Т. 12. №11 2026
https://doi.org/10.33619/2414-2948/132

Разработанная методика на основе автоматизированных деревьев решений является наиболее адаптивной для условий Кыргызстана. Она позволяет не только с высокой точностью прогнозировать состав газа, но и учитывать региональную специфику сырья, которую игнорируют усредненные зарубежные модели. Полученные результаты доказывают, что использование композитного топлива на основе ресурсов Ошской, Джалал-Абадской и Баткенской областях при температуре 900°C является оптимальным режимом для получения высококалорийного синтез-газа.

Результаты показывают, что использование деревьев решений позволяет учитывать «эффект синергии» при совместном сжигании угля и биомассы. Модель, разработанная в данной работе, демонстрирует более низкую ошибку RMSE (0.04) по сравнению с равновесными моделями китайских коллег (0.12). Это объясняется тем, что деревья решений лучше учитывают дискретные изменения параметров (например, резкое изменение зольности углей). В отличие от классических моделей СНГ, разработанный подход эффективен для многокомпонентных смесей «уголь-биомасса».

Выводы

Теоретически обосновано применение деревьев решений как наиболее интерпретируемого метода для управления процессами газификации в условиях вариативности регионального сырья.

Установлено, что добавление 40% биомассы(скорлупа) к Алайскому углю повышает выход водорода на 18.3% при использовании оптимизированных алгоритмом параметров.

Модель показала высокую устойчивость к специфическим факторам (высокая зольность, наличие масел в косточках), что подтверждается коэффициентом детерминации R2 = 0.95.

Практические рекомендации

Использовать разработанные алгоритмы в качестве основы для ПО контроллеров малых газификационных установок в южном регионе КР.

Интегрировать блок поправки на барометрическое давление (высотность) при эксплуатации установок выше 1500 м над уровнем моря.

Применять модель для расчета ТЭО мобильных установок переработки отходов садоводства в Ошской, Джалал-Абадской и Баткенской областях.

Список литературы:

1. Национальная стратегия развития Кыргызской Республики на 2018–2040 годы: утверждена Указом Президента Кыргызской Республики от 31 октября 2018 года № 221. Бишкек, 2018. 134 с.

2. Касымова В., Батыркул Б. Энергетика Кыргызстана: состояние отрасли и перспективы межгосударственного сотрудничества // Центральная Азия и Кавказ. 2007. №6(54). С. 116-127.

3. Сыдыков Б. К. Энергетическая безопасность Кыргызской Республики. Бишкек, 2011. 188 с.

4. Мутовин С. И., Пыжев А. И., Пыжева Ю. И. Перспективы низкоуглеродного развития энергетики Республики Кыргызстан // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. 2025. Т. 18. №4. С. 826-833.

5. Торгоев И. А, Алешин Ю. Г. Геоэкология и отходы горнопромышленного комплекса Кыргызстана. Бишкек, 2009. 240 с.

6. Кожогулов К. Ч. Комплексное освоение угольных месторождений Кыргызстана // Наука и новые технологии. 2019. №2. С. 15-20.

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

7. Energy G. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector // Revised Version. 2021.

8. Порфирьев Б. Н., Широв А. А., Колпаков А. Ю. Стратегия низкоуглеродного развития: перспективы для экономики России // Мировая экономика и международные отношения. – 2020. Т. 64. №9. С. 15-25.

9. Исмагилова О. Д. Ценообразование на углеродные выбросы: мировой опыт // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2023. Т. 39. №4. С. 470-495.

10. Зайченко В. М., Лавренов В. А., Ларина О. М. Энергетическая утилизация биомассы. Новые технологии // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58. №4. С. 723-731.

11. Sharma A. K., Ghodke P. K., Goyal N., Nethaji S., Chen W. H. Machine learning technology in biohydrogen production from agriculture waste: Recent advances and future perspectives // Bioresource technology. 2022. V. 364. P. 128076. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128076

12. Rutland H., You J., Liu H., Bull L., Reynolds D. A systematic review of machine-learning solutions in anaerobic digestion // Bioengineering. 2023. V. 10. №12. P. 1410. https://doi.org/10.3390/bioengineering10121410

13. Абрамов В. И., Гордеев В. В., Столяров А. Д. Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития // Вопросы инновационной экономики. 2024. Т. 14. №3. С. 691-716.

14. Induchoodan T. G., Haq I., Kalamdhad A. S. Factors affecting anaerobic digestion for biogas production: A review // Advanced organic waste management. 2022. P. 223-233. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00020-4

15. Cruz I. A., Chuenchart W., Long F., Surendra K. C., Andrade L. R. S., Bilal M., Ferreira L. F. R. Application of machine learning in anaerobic digestion: Perspectives and challenges // Bioresource Technology. 2022. V. 345. P. 126433. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126433

16. Jeong K., Abbas A., Shin J., Son M., Kim Y. M., Cho K. H. Prediction of biogas production in anaerobic co-digestion of organic wastes using deep learning models // Water research. 2021. V. 205. P. 117697. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117697

17. Mohan D., Pittman C. U., Steele P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review // Energy & fuels. 2006. V. 20. №3. P. 848-889. https://doi.org/10.1021/ef0502397

References:

1. Natsional'naya strategiya razvitiya Kyrgyzskoi Respubliki na 2018–2040 gody: utverzhdena Ukazom Prezidenta Kyrgyzskoi Respubliki ot 31 oktyabrya 2018 goda № 221 (2018). Bishkek. (in Russian).

2. Kasymova, V., & Batyrkul, B. (2007). Energetika Kyrgyzstana: sostoyanie otrasli i perspektivy mezhgosudarstvennogo sotrudnichestva. *Tsentral'naya Aziya i Kavkaz,* (6 (54)), 116-127. (in Russian).

3. Sydykov, B. K. (2011). Energeticheskaya bezopasnost' Kyrgyzskoi Respubliki. Bishkek. (in Russian).

4. Mutovin, S. I., Pyzhev, A. I., & Pyzheva, Yu. I. (2025). Perspektivy nizkouglerodnogo razvitiya energetiki Respubliki Kyrgyzstan. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Gumanitarnye nauki, 18*(4), 826-833. (in Russian).

5. Torgoev, I. A, & Aleshin, Yu. G. (2009). Geoekologiya i otkhody gornopromyshlennogo kompleksa Kyrgyzstana. Bishkek. (in Russian).

6. Kozhogulov, K. Ch. (2019). Kompleksnoe osvoenie ugol'nykh mestorozhdenii Kyrgyzstana. *Nauka i novye tekhnologii,* (2), 15-20. (in Russian).

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

7. Energy, G. (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. *Revised Version*.

8. Porfir'ev, B. N., Shirov, A. A., & Kolpakov, A. Yu. (2020). Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya: perspektivy dlya ekonomiki Rossii. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya, 64*(9), 15-25. (in Russian).

9. Ismagilova, O. D. (2023). Tsenoobrazovanie na uglerodnye vybrosy: mirovoi opyt. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika, 39*(4), 470-495. (in Russian).

10. Zaichenko, V. M., Lavrenov, V. A., & Larina, O. M. (2020). Energeticheskaya utilizatsiya biomassy. *Novye tekhnologii. Teplofizika vysokikh temperatur, 58*(4), 723-731. (in Russian).

11. Sharma, A. K., Ghodke, P. K., Goyal, N., Nethaji, S., & Chen, W. H. (2022). Machine learning technology in biohydrogen production from agriculture waste: Recent advances and future perspectives. *Bioresource technology*, *364*, 128076. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128076

12. Rutland, H., You, J., Liu, H., Bull, L., & Reynolds, D. (2023). A systematic review of machine-learning solutions in anaerobic digestion. *Bioengineering*, *10*(12), 1410. https://doi.org/10.3390/bioengineering10121410

13. Abramov, V. I., Gordeev, V. V., & Stolyarov, A. D. (2024). Tsifrovye dvoiniki: kharakteristiki, tipologiya, praktiki razvitiya. *Voprosy innovatsionnoi ekonomiki, 14*(3), 691-716. (in Russian).

14. Induchoodan, T. G., Haq, I., & Kalamdhad, A. S. (2022). Factors affecting anaerobic digestion for biogas production: A review. *Advanced organic waste management*, 223-233. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00020-4

15. Cruz, I. A., Chuenchart, W., Long, F., Surendra, K. C., Andrade, L. R. S., Bilal, M., ... & Ferreira, L. F. R. (2022). Application of machine learning in anaerobic digestion: Perspectives and challenges. *Bioresource Technology*, *345*, 126433. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126433

16. Jeong, K., Abbas, A., Shin, J., Son, M., Kim, Y. M., & Cho, K. H. (2021). Prediction of biogas production in anaerobic co-digestion of organic wastes https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117697 using deep learning models. *Water research*, *205*, 117697.

17. Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & fuels*, *20*(3), 848-889. https://doi.org/10.1021/ef0502397

Поступила в редакцию
09.08.2026 г.

Принята к публикации
16.08.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Ташполотов Ы., Абсамат кызы Г., Сулайман уулу З., Сабиров Б. З. Оптимизация параметров выхода синтез-газа при совместной газификации агроотходов южного региона и углей Кыргызстана на основе ансамблевых алгоритмов деревьев решений // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №11. С. 137-148. https://doi.org/10.33619/2414-2948/132/16

Cite as (APA):

Tashpolotov, Y., Absamat kyzy, G., Sulaiman uulu, Z., & Sabirov, B. (2026). Optimization of Syngas Output Parameters in the Co-Gasification of Southern Region Agro-Waste and Kyrgyzstan Coals Based on Ensemble Decision Tree Algorithms. *Bulletin of Science and Practice, 12*(11), 137-148. (in Russian). https://doi.org/10.33619/2414-2948/132/16

Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)