

УДК 631.371:662.638:665.33

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-410-09-147-153

Р.В. Ахметова ✉

А.Э. Ахметов

Казанский государственный
энергетический университет,
Казань, Россия

✉ ahmetova_rv@bk.ru

Поступила в редакцию: 26.05.2026

Одобрена после рецензирования: 10.08.2026

Принята к публикации: 26.08.2026

© Ахметова Р.В., Ахметов А.Э.

Замещение природного газа гранулированной лузгой подсолнечника в паровых котельных маслоэкстракционных производств: резервы повышения КПД при ограничении по оксиду углерода

РЕЗЮМЕ

Обрушивание маслосемян оставляет лузгу, которую маслоэкстракционные заводы сжигают в собственных котельных, замещая покупной природный газ. Резервы экономии топлива при такой замене оценивают в допущении, что коэффициент избытка воздуха и потери от недожога снижаются совместно. Цель работы — количественно оценить эти резервы при физически корректном учете недожога и ограничении по концентрации СО. Потери от химического и механического недожога описаны растущими при уменьшении α зависимостями с калибровкой по опубликованным натурным испытаниям, рабочая точка найдена как условный минимум суммы потерь. Модель обратного теплового баланса верифицирована на 16 режимах котла ДКВр-6,5-13ГМ: смещение расчётной q_2 составило -0,08 п.п. при СКО 0,03 п.п. На газе переход от штатной автоматики к регулированию по O_2 и СО повышает КПД брутто с 91,34 до 92,83 % (измерено 91,31 и 92,78 %), причём 1,12 из 1,49 п.п. дало снижение температуры уходящих газов, а не воздушный режим; для котла ДЕ-25-14ГМ выигрыш лежит между нулем и 2,25 п.п. и задан объектным параметром αCO . При переходе на гранулированную лузгу резерв меняет знак: у котла ДКВр-10-13 удержать СО на уровне 500 мг/м³ можно, лишь подняв α с 1,82 до 1,95–2,21, ценой 0,22–1,17 п.п. КПД, тогда как достижимые 1,04 п.п. лежат в распределении дутья и снижении температуры уходящих газов. Изменчивость партий агросырья разносит допустимую уставку кислорода на 10,0–14,1% об., что исключает стационарную режимную карту. Градиентный бустинг восстанавливает уставку с MAE 0,197% O_2 при $R^2 = 0,940$ против 0,796% O_2 у постоянной уставки, а квантильный вариант удерживает ограничение в 92,1% режимов ценой 0,52 п.п. вместо 1,83 п.п.

Ключевые слова: отходы маслоэкстракционного производства, гранулированная лузга подсолнечника, энергообеспечение предприятий АПК, замещение природного газа, паровой котел, ограничение по оксиду углерода, изменчивость партий агросырья, обратный тепловой баланс, адаптивная уставка остаточного кислорода, градиентный бустинг

Для цитирования: Ахметова Р.В., Ахметов А.Э. Замещение природного газа гранулированной лузгой подсолнечника в паровых котельных маслоэкстракционных производств: резервы повышения КПД при ограничении по оксиду углерода. *Аграрная наука*. 2026; 410(09): 147–153.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-410-09-147-153>

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-410-09-147-153

Rimma V. Akhmetova ✉

Askar E. Akhmetov

Kazan State Power Engineering
University, Kazan, Russia

✉ ahmetova_rv@bk.ru

Received by the editorial office: 26.05.2026

Accepted in revised: 10.08.2026

Accepted for publication: 26.08.2026

© Akhmetova R.V., Akhmetov A.E.

Replacing natural gas with granulated sunflower husk in the steam boiler plants of oil extraction facilities: efficiency reserves under a carbon monoxide constraint

ABSTRACT

Dehulling of oilseeds leaves husk, which oil extraction plants burn in their own boiler houses in place of purchased natural gas. Fuel saving reserves for such a substitution are usually estimated on the assumption that the excess air ratio and the incomplete combustion loss fall together. This work quantifies those reserves with a physically consistent treatment of incomplete combustion and a carbon monoxide constraint. The chemical and mechanical incomplete combustion losses are represented by functions that rise as the excess air ratio is reduced, calibrated against published field tests, and the operating point is located as the constrained minimum of the total loss. The model was verified against 16 measured regimes of a DKVr-6.5-13GM boiler: the flue gas heat loss was reproduced with a bias of -0.08 pp and a standard deviation of 0.03 pp. On natural gas, replacing the standard controls with combined oxygen and carbon monoxide control raises the gross efficiency from 91.34 to 92.83% (measured: 91.31 and 92.78%), yet 1.12 of the 1.49 pp comes from the lower flue gas temperature rather than from the air regime; for a DE-25-14GM boiler the gain falls anywhere between zero and 2.25 pp and is fixed by the site-specific parameter αCO . Upon conversion to granulated sunflower husk the reserve changes sign: for a DKVr-10-13 boiler, holding carbon monoxide at 500 mg/m³ requires raising the excess air ratio from 1.82 to 1.95–2.21, at a cost of 0.22–1.17 pp of gross efficiency, whereas the attainable 1.04 pp lies in air distribution and flue gas temperature. Batch variability of the agricultural feedstock spreads the admissible oxygen setpoint over 10.0–14.1 vol. %, which rules out a fixed regime chart. Gradient boosting recovers the setpoint with a mean absolute error of 0.197% O_2 at $R^2 = 0.940$, against 0.796% O_2 for a fixed setpoint, and its quantile loss variant keeps the constraint satisfied in 92.1% of the regimes at a cost of 0.52 pp instead of 1.83 pp.

Key words: oil extraction waste; granulated sunflower husk; energy supply of agro-industrial enterprises; natural gas replacement; steam boiler; carbon monoxide constraint; agricultural feedstock batch variability; reverse heat balance; adaptive residual oxygen setpoint; gradient boosting

For citation: Akhmetova R.V., Akhmetov A.E. Replacing natural gas with granulated sunflower husk in the steam boiler plants of oil extraction facilities: efficiency reserves under a carbon monoxide constraint. *Agrarian science*. 2026; 410(09): 147–153 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-410-09-147-153>

Введение/Introduction

Переработка маслосемян принадлежит к наиболее энергоемким производствам агропромышленного комплекса. Пар давлением 1,3–1,4 МПа расходуется на влаготепловую обработку мятки, дистилляцию растворителя, тостирование шрота, сушку и подготовку семян к хранению, а также на отопление корпусов; потребность закрывают производственно-отопительные котельные с котлами ДКВр, ДЕ и КЕ, которые эксплуатируют по стационарным режимным картам.

Обрушивание семян оставляет лузгу. Мировой сбор подсолнечника в сезоне 2020/2021 гг. составил 50 млн т, доля России 27% [1], и каждая переработанная тонна семян оставляет отход, требующий утилизации. Сжигание гранулированной лузги в собственной котельной решает две задачи одновременно: снимает вопрос обращения с отходом и замещает покупной природный газ. Зольный остаток сохраняет агрономическую ценность и пригоден в качестве удобрения, поэтому схема замыкает материально-энергетический цикл переработки внутри предприятия [1].

Топливо остается крупной статьей себестоимости, и вопрос о резервах его экономии возникает при каждой режимной наладке. Принятая схема оценки такова: фиксируют «эксплуатационный» коэффициент избытка воздуха α , назначают «оптимизированный» меньший, а разность потерь с уходящими газами объявляют резервом. Схема не учитывает, что снижение α уменьшает потерю q_2 , но увеличивает потери от химического q_3 и механического q_4 недожога. Одновременное убывание всех трех слагаемых невозможно, и сумма управляемых потерь имеет внутренний минимум.

Для гранулированной лузги положение этого минимума и его допустимость определяются свойствами самого агросырья: содержание кислорода в рабочей массе достигает 39,4%, выход летучих 77,5% горючей массы [1], поэтому полнота выгорания требует значительного воздушного запаса. Опубликованные замеры это подтверждают. При O_2 около 9,5% об. концентрация СО на гранулах лузги составляет 1095–1098 мг/м³ [2–4]; тот же уровень зафиксировал длительный мониторинг промышленного котла тепловой мощностью 2,3 МВт [5], а на маломощном теплогенераторе СО достигает 3522–9763 мг/м³ [6]. Древесные гранулы при близких α дают 198–470 мг/м³ [7, 8], то есть различие задано видом биомассы, а не режимом сжигания.

Вторая особенность агросырья — непостоянство состава. Влажность рабочей массы гранул изменяется в пределах 6,6–8,7%, зольность 2,47–3,40%, низшая теплота сгорания 16,55–18,2 МДж/кг [1–3, 9], а допуски стандарта на недревесные пеллеты¹ ещё шире. Партия зави-

сит от сорта и района выращивания, года, режима отжима и условий хранения, то есть от факторов, лежащих вне котельной. Расчет по средним значениям состава выводит эту изменчивость за рамки задачи, а стационарная режимная карта не в состоянии за ней следовать.

Цифровизация АПК развивается преимущественно в полевых процессах и логистике [10, 11], энергетическое хозяйство перерабатывающих предприятий охвачено ею слабее. Применение машинного обучения к моделированию и управлению горением известно с начала 2000-х гг. [12]; современные работы используют глубокие сети с многокритериальной оптимизацией [13] и гибридные цифровые двойники [14]. Управление сжиганием биомассы по тренду концентрации СО реализовано [15], однако допустимая уставка остаточного кислорода там не восстанавливалась.

Гипотеза исследования состоит в том, что при замещении природного газа гранулированными отходами маслоэкстракционного производства резерв, связанный с воздушным режимом, меняет знак: снижение α , оправданное на газе, для лузги запрещено ограничением по выбросам СО и приводит к перерасходу топлива. Изменчивость партий отхода при этом настолько велика, что ни одно фиксированное значение уставки остаточного кислорода не обеспечивает выполнения ограничения.

Цель работы — количественно оценить резервы повышения КПД брутто паровых котлов маслоэкстракционного производства при физически корректном учете потерь от недожога и ограничении по концентрации оксида углерода. Поставлены две задачи. Первая: построить модель обратного теплового баланса, верифицировать ее по опубликованным натурным испытаниям, определить рабочую точку как условный минимум управляемых потерь и оценить неопределенность результата. Вторая — восстановить допустимую по СО установку остаточного кислорода методами машинного обучения по признакам, доступным в штатном контуре измерения котельной.

Научная новизна работы состоит в следующем. Установлена смена знака резерва воздушного режима при переходе котельной перерабатывающего предприятия с природного газа на гранулированные отходы маслоэкстракции, а граница допустимого по СО режима получена как функция показателя качества смесеобразования. Изменчивость партий агросырья введена в задачу режимной наладки как самостоятельный фактор: допустимая уставка остаточного кислорода меняется по партиям в диапазоне, на порядок превышающем точность ее поддержания по стационарной карте.

¹ ГОСТ 33103.6–2017 (ISO 17225-6:2014). Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива. Часть 6. Классификация недревесных пеллет. Москва: Стандартинформ, 2017.

Материал и методы исследования / Material and methods

Исследование выполняли в 2025–2026 гг. на кафедре «Электрические станции» Казанского государственного энергетического университета (Казань) как вычислительный эксперимент с верификацией по независимым результатам натурных испытаний, опубликованным в 2012–2025 гг. Характеристики гранулированной лузги приняты по данным анализа образцов Казанского маслоэкстракционного завода [1]; элементный состав пересчитан с сухой массы на рабочую при $W_p = 6,80\%$. Верификационный набор составили 16 режимов котла ДКВр-6,5-13ГМ, испытанного при четырех нагрузках и четырех способах регулирования [16].

КПД брутто определяли обратным тепловым балансом по нормативному методу²: $\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$. Объемы воздуха и продуктов сгорания находили стехиометрически по элементному составу гранул и объемным долям углеводородов газа; влагосодержание воздуха принято 10 г/кг, энтальпии рассчитывали по средним объемным теплоемкостям.

$$q_2 = (I_g - I_v) / Q_{pp} \times (100 - q_4) / 100 \times 100 \% \quad (1)$$

Потерю от химического недожога вычисляли по измеренной концентрации CO , а не по табличным значениям³:

$$q_3 = 100 \times Q_{CO} \times V_{CO} / Q_{pp}, \quad (2)$$

где $Q_{CO} = 12\,640$ кДж/м³.

Опубликованные концентрации отнесены к 10% O_2 ; к фактическим их приводили множителем $(21 - O_{2, оп}) / (21 - O_{2, факт})$. Потерю q_4 задавали как функцию избытка воздуха:

$$q_4(\alpha) = 100 \times 32\,700 \times (A_p / 100) \times C_{ун} / [(100 - C_{ун}) \times Q_{pp}] \times \exp[-k_4(\alpha - \alpha_{оп})], \quad (3)$$

где $C_{ун}$ — содержание углерода в уносе.

Коэффициент $k_4 = 0,80$ найден по данным [17], где конверсия углерода возрастает с 74,2 до 83,4% при увеличении α с 2,53 до 3,08, откуда $k_4 = \ln(25,8/16,6)/0,55$. Потерю q_5 принимали постоянной: 1,1% для котла 25 т/ч и 1,7% для котла 10 т/ч при нагрузке около 60% номинальной³. У газа q_6 равна нулю; у гранул при зольности ниже 3% она не превышает 0,1% и также принята нулевой, поэтому КПД брутто завышен не более чем на 0,1 п.п.

Концентрацию CO описывали функцией с полюсом при $\alpha \rightarrow 1$:

$$CCO(\alpha) = CCO_{оп} \times [(\alpha_{оп} - 1) / (\alpha - 1)]^n \quad (4)$$

Показатель n универсального значения не имеет: он характеризует качество смесеобразования конкретного объекта и определялся по двум

измеренным точкам. За рабочий режим принимали условный минимум управляемых потерь:

$$\alpha^* = \arg \min [q_2(\alpha) + q_3(\alpha) + q_4(\alpha)]$$

$$\text{при } CCO(\alpha) \leq CCO_{доп} \quad (5)$$

Действующие стандарты не устанавливают норматив по CO для паровых котлов производительностью 10–25 т/ч. Содержание CO на выходе из топки при $\alpha = 1$ ограничено значением 0,05% об.⁴, норматив 130–160 мг/м³ распространяется только на водогрейные котлы мощностью 0,1–4,0 МВт⁵, а требования к котлам 160–3950 т/ч⁶ к рассматриваемым объектам не относятся. Ограничения задавали поэтому самостоятельно: для газового котла 240 ppm (300 мг/м³), для котла на гранулах параметрически при 300, 500, 1000 и 1500 мг/м³ в пересчете к 10% O_2 .

Первым объектом принят котел ДЕ-25-14ГМ производительностью 25 т/ч при давлении 1,4 МПа на природном газе состава CH_4 91,5; C_2H_6 0,9; C_3H_8 0,3; C_4H_{10} 0,1; N_2 6,6; CO_2 0,6% об., что дает $Q_{нр} = 33,80$ МДж/м³ и $V^0 = 8,963$ м³/м³ при эксплуатационных α 1,40; 1,55 и 1,65. Вторым объект — котел ДКВр-10-13 производительностью 10 т/ч при давлении 1,3 МПа, сжигающий гранулы лузги; рабочая масса пересчитана из [1]: C_p 44,10; H_p 6,06; O_p 39,40; N_p 0,89; S_p 0,05; W_p 6,80; A_p 2,70%. Формула Менделеева даёт $Q_{нр} = 16,75$ МДж/кг и $V^0 = 4,216$ м³/кг против измеренных 16,55 [2] и завышенных 18,2 [3]. Опорной точкой служит CO 1100 мг/м³ при 10 % O_2 (замер при 9,5%, $\alpha_{оп} = 1,815$); приняты $\vartheta_{ух}$ 150 °С для газа и 165 °С для гранул, $t_{хв}$ 30 °С.

Модель проверена на 16 режимах котла ДКВр-6,5-13ГМ [16] при нагрузках 50, 65, 80 и 100%. Состав газа в источнике не приведен и принят близким к первому объекту: $Q_{нр} = 33,65$ МДж/м³, $V^0 = 8,925$ м³/м³. Расчет вели по измеренным O_2 и $\vartheta_{ух}$, а не по q_2 ; запись « $CO < 10$ ppm» интерпретировали как 10 ppm. Прочие потери восстановили как $100 - \eta_{изм} - q_{2,изм} - q_3$, расч и усреднили по нагрузкам, получив 4,17; 3,24; 2,77 и 2,17 п.п. Температура холодного воздуха в источнике также отсутствует и принята равной 25 °С. Неопределенность оценивали методом Монте-Карло при 12 000 реализациях: варьировали состав гранул, затем добавили $CCO_{оп}$ 700–1600 мг/м³, $n = 1-3$, $C_{ун}$ 15–35% и погрешность $\vartheta_{ух}$ со СКО 3 °С.

Уставку O_2^* при $CCO_{доп} = 500$ мг/м³ восстанавливали по десяти признакам: нагрузка, измеренный O_2 , приведенная концентрация CO и ее логарифмическая чувствительность при $\Delta\alpha = 0,05$, $\vartheta_{ух}$, $t_{хв}$, влажность, зольность, $Q_{нр}$ партии и оценка q_2 . Выборку сформировал цифровой двойник

² Тепловой расчёт котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и доп. / подгот. АООТ «ВТИ» и АООТ «НПО ЦКТИ». Санкт-Петербург, 1998. 256 с.

³ Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час: утв. Госкомэкологии России 09.07.1999. Москва, 1999.

⁴ ГОСТ 21204–97. Горелки газовые промышленные. Общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 1998.

⁵ ГОСТ 30735–2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4,0 МВт. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2002.

⁶ ГОСТ Р 50831–2025. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. Москва: Российский институт стандартизации, 2025.

объекта: 500 партий по 12 режимов, всего 6000 наблюдений. Сравнивали постоянную уставку, гребневую регрессию, перцептрон 64–32 и градиентный бустинг с квадратичной и квантильной потерями при $\tau = 0,90; 0,95$ и $0,98$, поскольку занижение уставки обходится дороже завышения. Проверку проводили по партиям (GroupKFold, пять блоков), значимость признаков оценивали перестановками при 15 повторах.

Работа носит расчетный характер, собственных замеров на котельной перерабатывающего предприятия не проводилось. Прочие потери восстановлены из измеренных значений КПД и q_2 , поэтому остаток по КПД равен остатку по q_2 с обратным знаком. Показатель n для лузги в публикациях отсутствует: доступны лишь $\alpha \approx 1,6$ – $2,7$ при концентрациях СО, различающихся почти на порядок [2–4, 6], а область $\alpha < 1,6$ получена экстраполяцией. Достигнутое согласие с измерениями отвечает допуску приёмочных испытаний⁷: $\pm 0,5$ п.п. по КПД и $\pm 0,05$ по положению оптимума

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Смещение расчетной q_2 составило $-0,08$ п.п. при СКО $0,03$ п.п. и наибольшем по модулю отклонении $0,13$ п.п.; восстановленный α расходится с источником не более чем на $0,015$. Сама потеря изменяется в пределах $2,29$ п.п. ($4,94$ – $7,23\%$), то есть разброс остатков почти на два порядка меньше диапазона верифицируемой величины. Данные охватывают $\alpha = 1,50$ – $2,19$ и $\vartheta_{\text{ух}} = 100$ – 122 °С. Показатель n калибровали по двум режимам каждой нагрузки, получив $10,7; 11,0; 10,6$ и $16,1$ при среднем $12,1$: три нагрузки дают близкие оценки, номинальная выпадает из ряда.

На тех же режимах проверен критерий (5). При опорной точке $\alpha = 1,50$ и СО = 245 ppm безусловный минимум суммы потерь приходится на $\alpha^* = 1,498$, граница по нормативу отвечает $\alpha = 1,501$, а наилучший по КПД режим в [16] реализован при $\alpha = 1,50$; расчётный КПД брутто в оптимуме равен $92,85\%$ против измеренных $92,78\%$. Независимой такую проверку считать нельзя, поскольку опорная точка взята из того же режима. Положение минимума круто зависит от n : при $n = 3$ оптимум смещается к $1,33$, при $n = 5$ к $1,42$, при $n = 8$ к $1,47$, и только значение $12,1$ согласует расчёт с экспериментом; смена опорной точки даёт $\alpha^* = 1,47$ – $1,56$.

Более строгую проверку дало сопоставление двух способов

регулирования на номинальной нагрузке. Штатная автоматика удерживала $\alpha = 1,67$ при $\vartheta_{\text{ух}} = 122$ °С, регулирование по O_2 и СО — $1,50$ и 105 °С; измеренный КПД брутто вырос с $91,31$ до $92,78\%$ ($1,47$ п.п.), расчётный с $91,34$ до $92,83\%$ ($1,49$ п.п.), расхождение составило $0,03$ и $0,05$ п.п. На снижение α приходится $0,47$ п.п. прироста, на снижение $\vartheta_{\text{ух}}$ на 17 °С $1,12$ п.п.; остаток $-0,10$ п.п. дало взаимодействие, так как q_3 вырос с $0,005$ до $0,116\%$. Больше двух третей прироста обеспечено состоянием хвостовых поверхностей, а не воздушным режимом.

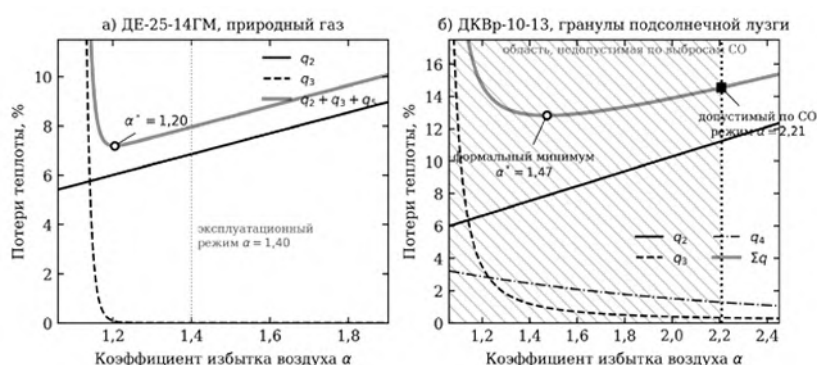
Прирост КПД брутто котла ДЕ-25-14ГМ определяется объектным параметром αCO , наименьшим значением α , при котором концентрация СО остаётся в пределах ограничения (рисунок 1, а). Оценка даёт от нуля до $2,25$ п.п.: при фактическом $\alpha = 1,55$ – $1,65$ и достижимой границе $1,10$ – $1,30$ прирост составляет $0,96$ – $2,25$ п.п. У котла из [16] $\alpha\text{CO} = 1,50$, поэтому работа при $\alpha = 1,40$ для него недопустима, а расчетная концентрация СО достигает 3577 ppm. Пока αCO не измерен, резерв нельзя назвать даже по порядку величины, что делает стационарный газоанализатор с каналом СО условием любой обоснованной наладки.

Смена знака резерва при переходе на гранулированную лузгу

У котла ДКВр-10-13 картина обратная (рисунок 1, б). В базовом режиме потери составляют $q_3 = 0,48\%$, $q_4 = 1,76\%$ и $q_2 = 9,44\%$, чему отвечает КПД брутто $86,62\%$. Сумма потерь формально минимальна при $\alpha = 1,22$ – $1,78$ в зависимости от n , однако во всём этом интервале расчётная концентрация СО составляет 1406 – 4038 мг/м³, что исключает эксплуатацию в найденном оптимуме.

Удержание СО на уровне 500 мг/м³ требует повышения α до $1,95$ – $2,21$ (таблица 1), то есть выше эксплуатационного значения $1,815$, и стоит $0,22$ – $1,17$ п.п. КПД брутто. Ограничивающим фактором выступает не избыток воздуха как таковой, а полнота выгорания летучих: при содержании кислорода около 40% рабочей массы и повышенной

Рис. 1. Потери теплоты в функции коэффициента избытка воздуха: а — котел ДЕ-25-14ГМ на природном газе при $\alpha\text{CO} = 1,20$; б — котел ДКВр-10-13 на гранулах подсолнечной лузги при $n = 2$. Штриховкой показана область, недопустимая по выбросам оксида углерода при $\text{CCO}_{\text{доп}} = 500$ мг/м³
Fig. 1. Heat losses as a function of the excess air ratio: (a) DE-25-14GM boiler fired with natural gas at $\alpha\text{CO} = 1,20$; (b) DKVr-10-13 boiler fired with sunflower husk pellets at $n = 2$. Hatching marks the region inadmissible by carbon monoxide emissions at a 500 mg/m³ limit



⁷ ГОСТ Р 55682.15–2013 (ЕН 12952-15:2003). Котлы водотрубные и котельно-вспомогательное оборудование. Часть 15. Приёмочные испытания. Москва: Стандартинформ, 2014.

Таблица 1. Требуемый коэффициент избытка воздуха и КПД брутто котла ДКВр-10-13 на гранулах подсолнечной лузги при различных ограничениях по концентрации оксида углерода

Table 1. Required excess air ratio and gross efficiency of a DKVr-10-13 boiler fired with sunflower husk pellets under different carbon monoxide limits

п	Формальный минимум α^*	СО при α^* , мг/м ³	ССО, доп = 300 мг/м ³	ССО, доп = 500 мг/м ³	ССО, доп = 1000 мг/м ³	ССО, доп = 1500 мг/м ³
1	1,22	4038	недостижимо	недостижимо	$\alpha = 1,90$ КПД = 86,36 $\Delta = -0,26$	$\alpha = 1,60$ КПД = 87,25 $\Delta = 0,63$
2	1,47	3280	недостижимо	$\alpha = 2,21$ КПД = 85,45 $\Delta = -1,17$	$\alpha = 1,85$ КПД = 86,52 $\Delta = -0,10$	$\alpha = 1,70$ КПД = 86,89 $\Delta = 0,27$
3	1,63	2359	$\alpha = 2,26$ КПД = 85,40 $\Delta = -1,22$	$\alpha = 2,06$ КПД = 86,01 $\Delta = -0,61$	$\alpha = 1,84$ КПД = 86,56 $\Delta = -0,06$	$\alpha = 1,74$ КПД = 86,75 $\Delta = 0,13$
5	1,78	1406	$\alpha = 2,06$ КПД = 86,14 $\Delta = -0,48$	$\alpha = 1,95$ КПД = 86,39 $\Delta = -0,22$	$\alpha = 1,83$ КПД = 86,61 $\Delta = -0,01$	$\alpha = 1,77$ КПД = 86,63 $\Delta = 0,01$

Примечание. Базовый режим $\alpha = 1,815$ ($O_2 = 9,5\%$ об.), КПД брутто 86,62%. Δ — изменение КПД брутто относительно базового режима; отрицательное значение означает, что ограничение по СО требует повышения избытка воздуха и снижает КПД. «Недостижимо» — требуемое α выходит за пределы работоспособности котла. Концентрации приведены к 10% O_2

Таблица 2. Качество восстановления допустимой уставки остаточного кислорода (пятиблочная групповая кросс-валидация по партиям топлива, 6000 наблюдений, 500 партий)

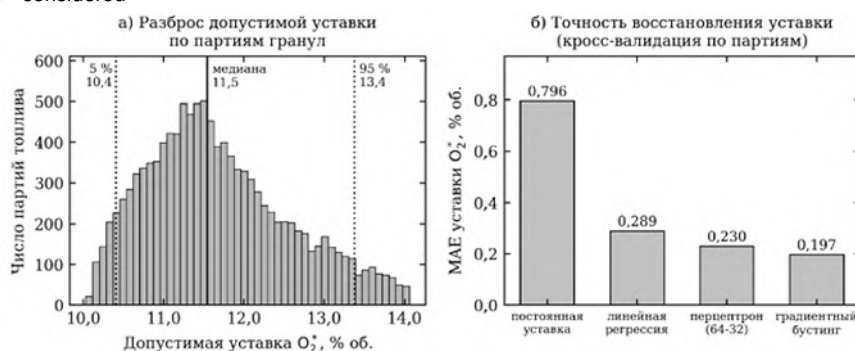
Table 2. Accuracy of admissible residual oxygen setpoint recovery (five-fold group cross-validation by fuel batch, 6000 observations, 500 batches)

Решение	MAE, % O_2	RMSE, % O_2	R^2	Доля $ \Delta \leq 0,5\%$, % O_2	Средняя потеря КПД, п.п.	Доля режимов с превышением СО, %
Постоянная уставка (медиана)	0,796	1,051	0,044	41,0	0,755	55,0
Гребневая линейная регрессия	0,289	0,404	0,846	83,7	—	—
Многослойный перцептрон 64–32	0,230	0,295	0,918	91,2	—	—
Градиентный бустинг, потери MSE	0,197	0,251	0,940	95,3	0,190	52,5
Градиентный бустинг, квантиль 0,90	0,296	0,370	0,871	81,5	0,254	19,9
Градиентный бустинг, квантиль 0,95	0,382	0,469	0,792	70,2	0,332	14,8
Градиентный бустинг, квантиль 0,98	0,564	0,679	0,564	50,7	0,521	7,9
Постоянная уставка с запасом (квантиль 0,90)	—	—	—	—	1,831	5,0
Постоянная уставка с запасом (квантиль 0,98)	—	—	—	—	3,494	1,0

Примечание. Технологические метрики (два последних столбца) вычислены на проверочной части одного разбиения (1200 наблюдений); средняя потеря КПД — среднее по модулю отклонение от КПД брутто при точной уставке

Рис. 2. Обоснование и качество адаптивного определения уставки: а — распределение допустимой по оксиду углерода уставки остаточного кислорода по партиям гранул (12 000 реализаций, ограничение 500 мг/м³); б — средняя абсолютная ошибка восстановления уставки различными моделями

Fig. 2. Rationale for and accuracy of adaptive setpoint determination: (a) distribution of the carbon-monoxide-admissible residual oxygen setpoint across pellet batches (12,000 realisations, 500 mg/m³ limit); (b) mean absolute error of setpoint recovery for the models considered



зольности она достигается лишь при значительном воздушном запасе. Гипотеза о смене знака подтверждается: приём, дающий на газе 0,47 п.п., на отходе маслоэкстракции переходит в потерю.

Резервы котла на лузге лежат вне управления средним значением α . Распределение первичного и вторичного дутья снижает концентрацию СО на 12% при неизменном α [18], граница опускается с 2,21 до 2,13, а КПД брутто растёт с 85,45 до 85,69% (0,24 п.п.). Охлаждение уходящих газов на 10 °С добавляет ещё 0,80 п.п., в базовом режиме тот же приём даёт 0,69 п.п. Суммарно достижимы 1,04 п.п., что отвечает КПД брутто 86,49%.

Неопределённость и уставка остаточного кислорода

Разброс характеристик гранул даёт Q_{nr} 15,04–16,86 МДж/кг ($\pm 5,7\%$ от медианы) и КПД брутто 86,16–86,87% при СКО 0,15 п.п. С учетом опорной концентрации СО, показателя n , уноса и φ_{ux} интервал расширяется до 84,69–88,20% (3,5 п.п.) при СКО q_4 0,57 против 0,22 у q_2 и 0,12 у q_3 . Точечная оценка КПД без интервала неопределённости в этих условиях не информативна. У газового котла q_2 неопределён на 0,31 п.п.: $t_{xv} \pm 5$ °С даёт 0,245, $\varphi_{ux} \pm 3$ °С 0,172, $O_2 \pm 0,2\%$ об. лишь 0,075.

Допустимая уставка меняется по партиям от 10,0 до 14,1% об. при 90-процентном интервале 10,4–13,4% (рисунок 2), тогда как точность поддержания уставки по стационарной карте на порядок выше этого разброса. Постоянное значение выполнения ограничения не обеспечивает.

При запасе в два СКО сжатие $\sigma(\alpha)$ с 0,15 до 0,05 поднимает КПД на газе с 91,62 до 92,46%, на гранулах с 84,40 до 85,11%.

Уставка O_2^* лежит в пределах 10,1–15,0% об. при СКО 1,03. Лучший результат получен градиентным бустингом: MAE 0,197% O_2 при $R^2 = 0,940$. Квантильная настройка сокращает долю режимов с превышением СО до 7,9% (таблица 2), причем цена такого запаса составляет 0,52 п.п. КПД против 1,83 п.п. у постоянной уставки, назначенной с той же надёжностью. Определяющими признаками оказались измеренная концентрация O_2 (0,72% O_2 к MAE при перестановке) и приведённая концентрация СО (0,60); чувствительность даёт 0,067, а характеристики партии неотличимы от нуля, поэтому непрерывное измерение СО делает лабораторный

анализ партии для этой задачи избыточным. МАЕ 0,322% O_2 достигается на 40 партиях (480 наблюдений), 0,200% на 400 партиях, асимптотическое поведение начинается после 160, то есть требуемый архив накапливается за один-два производственных сезона.

Расчётный расход топлива котлом ДКВр-10-13 при нагрузке около 60% номинальной составляет 979 кг/ч, что при 5600 ч работы в год даёт около 5,5 тыс. т гранул. Вводимая с топливом теплота, 92 ТДж в год, эквивалентна 2,7 млн m^3 природного газа: именно этот объём завод не покупает, направляя собственный отход в котельную. Достижимые 1,04 п.п. КПД брутто отвечают экономии 65,7 т гранул в год, а сжатие разброса α сохраняет еще 46,2 т. Зольный остаток при $Ar = 2,70\%$ составляет около 148 т в год и возвращается в сельскохозяйственный оборот [1]. Для газового котла ДЕ-25-14ГМ годовой расход при тех же условиях равен 8,0 млн m^3 , поэтому диапазон резерва 0,96–2,25 п.п. соответствует 84–197 тыс. m^3 газа; ширина интервала здесь важнее его границ, поскольку без измеренного αCO экономический расчет наладочных работ построить нельзя.

Основной практический вывод касается переноса опыта. Наладка газовых котельных строится на снижении избытка воздуха, и этот прием воспроизводят при переводе котлов на растительные отходы. Для гранулированной лузги он даёт обратный результат. Действительные резервы лежат в распределении дутья, состоянии хвостовых поверхностей и в адаптации уставки к текущей партии топлива.

Выводы/Conclusion

Проведенное исследование подтвердило, что гипотеза об одновременном снижении коэффициента избытка воздуха и потерь от недожога при сжигании органического топлива несостоятельна: уменьшение α снижает потерю с уходящими газами q_{2q2} , но закономерно увеличивает потери от химического q_{3q3} и механического q_{4q4} недожога. На основе верифицированной модели обратного теплового баланса (смещение расчетной q_{2q2} составило

–0,08 п.п. при СКО 0,03 п.п. по 16 режимам котла ДКВр-6,5-13ГМ) впервые количественно показано, что при переходе с природного газа на гранулированную лузгу подсолнечника резерв воздушного режима меняет знак. Если для газового котла ДЕ-25-14ГМ потенциальный прирост КПД брутто достигает 0,96–2,25 п.п. (при условии измерения объектного параметра αCO), то для котла ДКВр-10-13 на гранулах удержание концентрации CO на уровне 500 мг/ m^3 требует повышения α с эксплуатационного 1,82 до 1,95–2,21, что обходится в 0,22–1,17 п.п. КПД брутто. Реальный энергосберегающий эффект для лузги (до 1,04 п.п., или 65,7 т гранул в год) достигается не за счет снижения α , а за счет оптимизации распределения дутья и снижения температуры уходящих газов, причём более двух третей прироста КПД на газе также обусловлены состоянием хвостовых поверхностей, а не воздушным режимом.

Установлено, что изменчивость партий агро сырья (влажность, зольность, теплота сгорания) разносит допустимую по CO уставку остаточного кислорода в диапазоне 10,0–14,1% об., что делает стационарную режимную карту неприменимой. Для решения этой задачи впервые предложен и апробирован метод адаптивного восстановления уставки на основе градиентного бустинга по признакам штатного контура измерения (измеренный O_2 , приведённая концентрация CO , температура уходящих газов). Лучшая модель обеспечивает МАЕ 0,197% O_2 при $R^2 = 0,940$, а квантильная настройка гарантирует выполнение ограничения по CO в 92,1% режимов ценой всего 0,52 п.п. КПД против 1,83 п.п. при постоянной уставке с тем же запасом надёжности. Полученные результаты носят расчетный характер и требуют натурной верификации, однако они однозначно свидетельствуют, что цифровая адаптация к текущей партии топлива является необходимым условием эффективной и экологически приемлемой эксплуатации паровых котельных маслоэкстракционных производств при замещении природного газа отходами переработки подсолнечника.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

FUNDING

The study was carried out using a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and teaching staff to defend doctoral dissertations and carry out research work.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Islamova S., Karaeva S., Timofeeva S., Kadyrov A. An experimental study of sunflower husk pellets combustion. BIO Web of Conferences. 2021; 37: 00070. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700070>
- Jach-Nocoń M., Pełka G., Luboń W., Mirowski T., Nocoń A., Pachytel P. An Assessment of the Efficiency and Emissions of a Pellet Boiler Combusting Multiple Pellet Types. Energies. 2021; 14(15): 4465. <https://doi.org/10.3390/en14154465>

- Zlateva P., Mileva N., Murzova M., Krumov K., Terziev A. Optimizing Sunflower Husk Pellet Combustion for B2B Bioenergy Commercialization. Energies. 2025; 18(15): 4189. <https://doi.org/10.3390/en18154189>
- Mileva N., Zlateva P., Ivanov M., Krumov K., Terziev A., Comarla A. Numerical and Experimental Analyses of Flue Gas Emissions, from Biomass Pellet Combustion in a Domestic Boiler. Eng. 2025; 6(10): 257. <https://doi.org/10.3390/eng6100257>

5. Kougiourmtzis M.A., Kanaveli I.P., Karampinis E., Grammelis P., Kakaras E. Combustion of olive tree pruning pellets versus sunflower husk pellets at industrial boiler. Monitoring of emissions and combustion efficiency. *Renewable Energy*. 2021; 171: 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.118>
6. Juszczak M. Pollutant concentrations from a 15 kW heating boiler supplied with sunflower husk pellets. *Environment Protection Engineering*. 2012; 38(1): 35–43.
7. Rzeźnik W., Rzeźnik I., Mielcarek-Bocheńska P., Urbański M. Air Pollutants Emission during Co-Combustion of Animal Manure and Wood Pellets in 15 kW Boiler. *Energies*. 2023; 16(18): 6691. <https://doi.org/10.3390/en16186691>
8. Ciupek B., Nadolny Z. Emission of Harmful Substances from the Combustion of Wood Pellets in a Low-Temperature Burner with Air Gradation: Research and Analysis of a Technical Problem. *Energies*. 2024; 17(13): 3087. <https://doi.org/10.3390/en17133087>
9. Islamova S., Tartygasheva A., Karaeva J., Panchenko V., Litt Y. A Comprehensive Study on the Combustion of Sunflower Husk Pellets by Thermogravimetric and Kinetic Analysis, Kriging Method. *Agriculture*. 2023; 13(4): 840. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040840>
10. Kalyani Y., Collier R. A Systematic Survey on the Role of Cloud, Fog, and Edge Computing Combination in Smart Agriculture. *Sensors*. 2021; 21(17): 5922. <https://doi.org/10.3390/s21175922>
11. Sathupadi K., Achar S., Bhaskaran S.V., Faruqi N., Abdullah-Al-Wadud M., Uddin J. Edge-Cloud Synergy for AI-Enhanced Sensor Network Data: A Real-Time Predictive Maintenance Framework. *Sensors*. 2024; 24(24): 7918. <https://doi.org/10.3390/s24247918>
12. Kalogirou S.A. Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2003; 29(6): 515–566. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00058-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00058-3)
13. Huang C. et al. Intelligent Deep Learning Modeling and Multi-Objective Optimization of Boiler Combustion System in Power Plants. *Processes*. 2025; 13(8): 2340. <https://doi.org/10.3390/pr13082340>
14. Cui Z., Jiang K., Chen W., Wang J., Niu Y. Digital twin enhanced hybrid modelling for main steam temperature optimization of flexible power plant. *Energy*. 2025; 335: 138132. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138132>
15. Mižáková J., Pitel J., Hošovský A., Pavlenko I., Ochowiak M., Khovanskyi S. Biomass Combustion Control in Small and Medium-Scale Boilers Based on Low Cost Sensing the Trend of Carbon Monoxide Emissions. *Processes*. 2021; 9(11): 2030. <https://doi.org/10.3390/pr9112030>
16. Janta-Lipińska S., Shkarovskiy A., Chrobak Ł. Improving the Fuel Combustion Quality Control System in Medium Power Boilers. *Energies*. 2024; 17(12): 3055. <https://doi.org/10.3390/en17123055>
17. Choiński B., Szatylowicz E., Zglobicka I., Joka Yildiz M. A Critical Investigation of Certificated Industrial Wood Pellet Combustion: Influence of Process Conditions on CO/CO₂ Emission. *Energies*. 2023; 16(1): 250. <https://doi.org/10.3390/en16010250>
18. Zlateva P., Terziev A., Krumov K., Murzova M., Mileva N. Research on the Combustion of Mixed Biomass Pellets in a Domestic Boiler. *Fuels*. 2025; 6(2): 40. <https://doi.org/10.3390/fuels6020040>

ОБ АВТОРАХ

Римма Валентиновна Ахметова

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электрические станции»
ahmetova_rv@bk.ru

Аскар Эдуардович Ахметов

студент
akhmetov.ae@mail.ru

Казанский государственный энергетический университет,
ул. Красносельская, 51, Казань, 420066, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Rimma Valentinovna Akhmetova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the
Department of Electric Power Stations
ahmetova_rv@bk.ru

Askar Eduardovich Akhmetov

Student
akhmetov.ae@mail.ru

Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya st., Kazan, 420066, Russia