

**А.Р. Хажиудинова¹, К.С. Зарыкбаева*, Е.Н. Мясоедова¹, А.Е. Сатыбалдинова¹,
С.Л. Елистратов²**

¹Шәкәрім университет,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

²Новосибирский государственный технический университет,

630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корпус 1

*e-mail: kamshat85.kz@mail.ru

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ УГОЛЬНОГО КОТЛА НА ОСНОВЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Аннотация: Рециркуляция дымовых газов (РДГ) является эффективным способом одновременного снижения выбросов оксидов азота и повышения энергетической эффективности угольных котлов за счёт управления температурой факела и составом рабочей смеси. В работе выполнено расчётно-аналитическое исследование применения РДГ на котле Е-90-3,9/440 ТЭЦ-1 при сжигании угля марки Д (разрез Каражыра). Цель – определить рациональную степень РДГ, обеспечивающую снижение NO_x при максимизации КПД брутто в пределах эксплуатационных ограничений. Методика основана на математической модели теплового баланса котла и обработке режимных данных до/после включения РДГ, оценены изменения состава дымовых газов и теплотехнических потерь при варьировании доли рециркуляции.

Установлено, что в рассматриваемом диапазоне степеней РДГ увеличение рециркуляции сопровождается ростом расчётного КПД брутто и снижением концентрации NO_x: при увеличении РДГ на 1% КПД возрастает на 0,25%, а NO_x уменьшается на 9 мг/м³. Рациональные показатели достигнуты при РДГ ≈ 20%, что соответствует расчётному КПД брутто 95,5% и снижению NO_x на 30% относительно базового режима. Результаты подтверждают целесообразность РДГ как технологического решения для повышения экологической и эксплуатационной эффективности угольных ТЭС Казахстана.

Ключевые слова: рециркуляция дымовых газов, угольный котел, выбросы оксидов азота, тепловая эффективность, оптимизация энергопотребления, сжигание угля.

Введение

Рециркуляция дымовых газов рассматривается как один из наиболее практичных способов экологизации и регулирования топочного процесса в энергетических котлах, работающих на твёрдом топливе. В научных исследованиях подчёркивается, что возврат части дымовых газов в зону горения позволяет управлять температурным уровнем факела и, как следствие, снижать образование оксидов азота при сохранении требуемых режимов работы котла [1]. Для обоснования эффективности таких мероприятий широко применяются расчётно-аналитические подходы: моделирование рециркуляции дымовых газов с использованием программных комплексов позволяет оценивать ожидаемое подавление NO_x и сопутствующие изменения теплотехнических показателей ещё на этапе выбора схемы внедрения [2].

При этом рециркуляция дымовых газов влияет не только на средние параметры горения, но и на динамику процесса. Показано, что изменение состава и теплоёмкости рабочей смеси при рециркуляции может затрагивать устойчивость пламени и характеристики самовозбуждающихся колебаний, что важно учитывать при выборе допустимого диапазона рециркуляции [3]. На уровне крупных энергоблоков влияние рециркуляции дымовых газов существенно зависит от выбранной схемы (точек отбора/ввода, распределения по трактам воздуха и газа): для ультрасверхкритических котлов отмечается необходимость подбора конфигурации рециркуляции дымовых газов с учётом тепловой схемы и условий теплообмена в топке [4]. В прикладных работах также акцентируется роль рециркуляции дымовых газов как инструмента эффективного регулирования топочного процесса в реальных эксплуатационных условиях, где ключевым является условие, снижением NO_x и сохранением $\eta_{бр}$ [5].

Современные направления развития энергетики расширяют область применения рециркуляция дымовых газов. В задачах кислородного сжигания (oxy-fuel) рециркуляция выступает одним из базовых механизмов формирования требуемых характеристик факела; описаны особенности внешнего вида пламени и режимов горения при использовании рециркуляция дымовых газов [6], а также экспериментально исследованы характеристики маломощных oxy-fuel котлов с РДГ в контексте технологий улавливания CO₂ [7]. В казахстанском контексте рециркуляция дымовых газов рассматривается как один из способов внедрения экологических технологий на действующих энергетических котлах, что повышает актуальность прикладных оценок и параметрической оптимизации [8]. Инженерная значимость направления подтверждается и наличием технических решений, закреплённых патентными разработками устройств рециркуляции дымовых газов [9], а также исследованиями, посвящёнными горелочным системам с внутренней и внешней двойной рециркуляцией, ориентированным на управление характеристиками горения [10].

Новые исследования уточняют механизмы влияния рециркуляции дымовых газов на образование NO_x и эффективность в более сложных условиях. Экспериментальные работы по s-CO₂ угольным котлам демонстрируют чувствительность формирования NO_x к параметрам рециркуляции и особенностям процесса горения [11]. На промышленных котлах большой мощности показана результативность сочетания рециркуляции дымовых газов с надтопочным воздухом как комплексного подхода к снижению NO_x при сохранении приемлемых режимах работы [12]. Одновременно численные исследования подчёркивают, что ввод рециркуляции дымовых газов в первичный воздух может сопровождаться побочными эффектами - изменением CO-эмиссии и потенциальными рисками низко-NO_x коррозии экранов, что требует поиска рационального диапазона рециркуляции [13]. С точки зрения экономичности и тепловых параметров котла влияние рециркуляции дымовых газов анализируется и для циркулирующих кипящих слоёв, где подчёркивается необходимость оценки не только экологического эффекта, но и эксплуатационной экономики [14]. Дополнительную вариативность вносит совместное сжигание угля с биомассой: показано, что рециркуляция дымовых газов в таких режимах существенно меняет характеристики горения, а итоговый эффект зависит от конфигурации топки и состава топлива [15].

Следовательно, литература подтверждает высокий потенциал рециркуляции дымовых газов, но одновременно указывает на выраженную зависимость результата от схемы реализации, типа котла и критериев оценки (NO_x, CO, устойчивость, теплотехнические потери и риски коррозии). Это определяет необходимость прикладных исследований, направленных на обоснование параметров рециркуляции дымовых газов для конкретных котлоагрегатов и условий эксплуатации с формированием инженерно-обоснованного параметра рециркуляции по совокупности экологических и энергетических показателей.

Цель работы – параметрически обосновать рациональную степень рециркуляции дымовых газов для угольного котла Е-90-3,9/440 (ТЭЦ-1, г. Семей) при сжигании угля марки Д (разрез Каражыра) по совокупности экологического критерия (NO_x) и энергетического критерия (КПД брутто $\eta_{бр}$) с учетом эксплуатационных ограничений. Для достижения цели выполнены:

- построение и верификация расчетной схемы теплового баланса на основе режимных данных до/после включения РДГ;
- количественная оценка влияния степени РДГ на составляющие тепловых потерь и $\eta_{бр}$;
- построение зависимости NO_x-R и выбор рационального уровня рециркуляции, обеспечивающего минимизацию выбросов при сохранении высокой энергетической эффективности.

Научная новизна заключается в прикладной двухкритериальной оптимизации параметров РДГ для конкретного котлоагрегата и топлива в условиях действующей угольной ТЭЦ, что позволяет перейти от общих литературных выводов к инженерно обоснованному выбору R.

Полученные зависимости и вывод о рациональном диапазоне степени рециркуляции справедливы для условий рассматриваемого объекта: угольный котёл Е-90-3,9/440 (ТЭЦ-1, г. Семей) при сжигании угля марки Д (разрез Каражыра) и для диапазона степеней рециркуляции R=0-25%. При существенном изменении характеристик топлива, конструктивной схемы котла, режима нагрузки и избытка воздуха, а также температурного

уровня уходящих газов требуется дополнительная верификация модели и уточнение рекомендуемого диапазона R.

Материалы и методы

Исследование выполнено с использованием расчётно-аналитического подхода на основе эксплуатационных (режимных) данных котлоагрегата и термодинамических расчётов. Объект исследования – угольный энергетический котёл Е-90-3,9/440, эксплуатируемый на ТЭЦ-1 г. Семей, при сжигании угля марки Д (разрез Каражыра).

Для количественной оценки влияния рециркуляции дымовых газов (РДГ) на энергетические и экологические показатели разработана математическая модель теплового баланса котла. Энергетическая эффективность характеризовалась КПД брутто $\eta_{бр}$, который определяли по методу обратного теплового баланса через суммарные тепловые потери:

$$\eta_{бр} = 100 - \sum q_i, \quad (1)$$

где $\sum q_i$ – относительные потери тепла (с уходящими газами, от химического/механического недожога, в окружающую среду и др.), вычисляемые по режимным параметрам котла.

Исходные режимные параметры котла (эксплуатационные данные) использовались как входные величины расчётно-аналитической модели. КПД брутто $\eta_{бр}$ определялся расчётно по методу обратного теплового баланса через суммарные относительные потери тепла. Степень рециркуляции R задавалась как расчётный параметр (доля возврата дымовых газов), для каждого значения R выполнялся пересчёт теплового баланса. Линейные зависимости $\eta_{бр}(R)$ и $NO_x(R)$ получены аппроксимацией результатов расчётных точек методом линейной регрессии.

Степень рециркуляции задавали как долю возврата дымовых газов в тракт горения:

$$R = \frac{G_{рец}}{G_{дг}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $G_{рец}$ – массовый расход рециркулируемых дымовых газов, кг/с;

$G_{дг}$ – расход дымовых газов на выходе котла, кг/с.

Для каждого уровня R выполнялся расчёт теплового баланса и сопоставление полученного $\eta_{бр}$ с базовым режимом (без РДГ).

Экологический эффект оценивали по изменению концентрации NO_x в дымовых газах. Дополнительно анализировали изменение компонентного состава дымовых газов до и после включения РДГ, что позволяет интерпретировать механизмы влияния РДГ на процесс горения (разбавление кислорода продуктами сгорания, изменение теплоёмкости газовой смеси и снижение температурного уровня факела).

Концентрацию NO_x представляли в единицах $мг/м^3$. Приведение результатов выполняли в соответствии с нормативной методикой СТ РК ГОСТ Р ИСО 10849-2010 измерения выбросов оксидов азота в дымовых газах (условия пересчёта к сухим газам и/или к стандартному содержанию кислорода) [16].

Состав дымовых газов до и после рециркуляции представлен на рисунке 1.

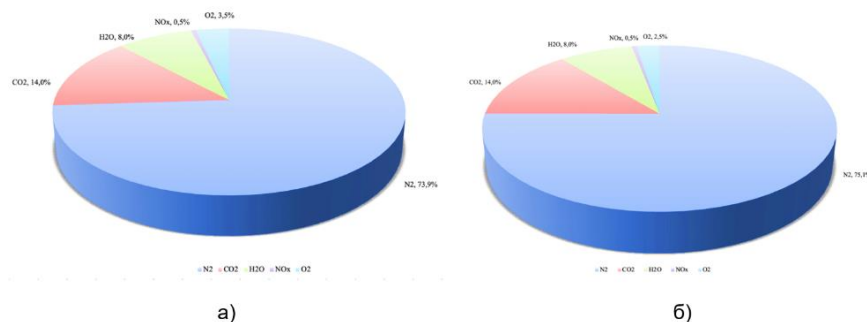


Рисунок 1 – Состав дымовых газов до (а) и после (б) включения рециркуляции дымовых газов

После включения РДГ наблюдается уменьшение доли O_2 (с 3,5% до 2,5%) при практически неизменных долях CO_2 (14%) и H_2O (8%), а доля инертной компоненты (преимущественно N_2) возрастает (с 73,9% до 75,1%). Эти изменения соответствуют физике процесса рециркуляции дымовых газов и связаны с разбавлением окислительной среды продуктами сгорания, что является одним из факторов снижения образования NOx .

Результаты и обсуждение

Анализ режимных данных показывает, что увеличение степени рециркуляции дымовых газов R приводит к росту КПД brutto котла $\eta_{бр}$ и одновременному снижению концентрации NOx . Зависимости $\eta_{бр}$ и NOx от уровня РДГ представлены на рисунке 2.

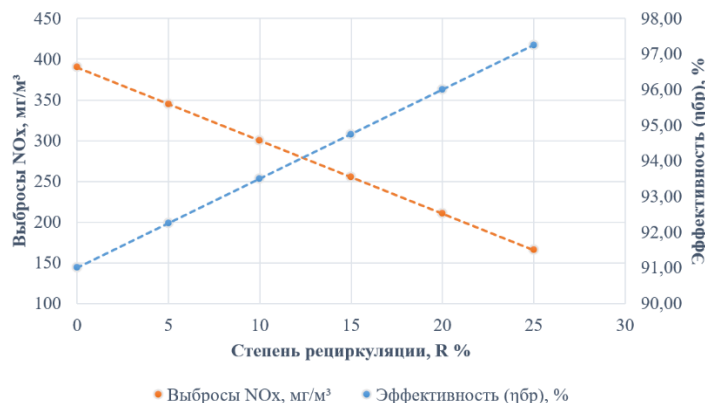


Рисунок 2 – Влияние степени рециркуляции дымовых газов на КПД brutto и выбросы NOx

Линейные зависимости, полученные по результатам математического моделирования, имеют вид:

$$\eta = 0,25R + 91 \quad (3)$$

$$NOx = -9R + 390 \quad (4)$$

Уравнения (2)-(3) показывают, что увеличение R на 1% сопровождается ростом $\eta_{бр}$ в среднем на 0,25 процентного пункта, тогда как концентрация NOx уменьшается на 9 мг/м³. В частности, при $\eta_{бр} = 96,0\%$ и $NOx = 210$ мг/м³. По сравнению с базовым режимом ($R=0\%$, $NOx = 390$ мг/м³) это соответствует снижению на 46%. Аппроксимация выполнена по $n=6$ стационарным режимным точкам ($R = 0-25\%$ с шагом 5%). Для обеих линейных зависимостей получено $R^2=1,00$.

Результаты показывают закономерный эффект РДГ:

- рост R уменьшает NOx , поскольку в зоне горения снижаются концентрация кислорода и максимальные температуры;

- $\eta_{бр}$ меняется слабо, так как влияние рециркуляции на тепловой баланс носит компенсирующий характер, то есть часть потерь уменьшается, часть – возрастает). В пределах исследуемого диапазона наилучшее сочетание экологического и энергетического критериев достигается при $R=20\%$;

- снижение NOx выражено, а КПД brutto практически не ухудшается по сравнению с базовым режимом.

Линейный характер зависимостей в рассмотренном диапазоне R свидетельствует о стабильном и предсказуемом изменении показателей, что позволяет использовать полученные уравнения для инженерной оценки экологического и энергетического эффекта РДГ при выборе рационального уровня рециркуляции.

Заключение

На основе результатов математического моделирования влияния рециркуляции дымовых газов на энергетические и экологические показатели котла (КПД brutto и выбросы NOx) в диапазоне степеней рециркуляции $R=0-25\%$ основные выводы можно сформулировать следующим образом:

- 1 Показано, что в рассматриваемом диапазоне R зависимость КПД brutto и концентрации NOx от степени рециркуляции имеет линейный характер, что подтверждается полученными аппроксимационными уравнениями. Линейность свидетельствует о стабильном и предсказуемом изменении показателей при регулировании уровня рециркуляции.

2 Согласно уравнению (2), увеличение степени рециркуляции на 1% приводит к росту $\eta_{бр}$ в среднем на 0,25 процентного пункта. При увеличении R от 0 до 25% КПД брутто возрастает ориентировочно с 91% до 97.

3 Согласно уравнению (3), увеличение R на 1% сопровождается уменьшением концентрации NOx на 9 мг/м³. При переходе от базового режима R=0% (NOx=390 мг/м³) к R=25% прогнозируемый уровень составляет 165 мг/м³, что соответствует снижению на 58%.

4 Наиболее показательный режим при R=20% соответствует $\eta_{бр}=96,0$ % и NOx=210 мг/м³. По сравнению с базовым режимом это обеспечивает снижение выбросов NOx на 46%, при одновременном увеличении КПД брутто на 5 %. Указанный рациональный уровень R=20% относится к условиям эксплуатации котла Е-90-3,9/440 на угле марки Д (Каражыра) в пределах рассмотренного диапазона режимных параметров, принятых в расчётно-аналитической модели.

5 Полученные зависимости могут быть использованы для инженерной оценки ожидаемого экологического и энергетического эффекта при выборе рационального уровня рециркуляции и для предварительного подбора уставок системы управления в пределах R=0-25%.

6 Ограничения и перспективы. Результаты относятся к рассмотренному диапазону R и условиям принятой модели. В дальнейших исследованиях целесообразно расширить диапазон рециркуляции и учесть влияние эксплуатационных факторов (нагрузка котла, коэффициент избытка воздуха, температурное поле и распределение кислорода, ограничения по устойчивости горения).

Список литературы

1. Effect of the coal-spreading air on airflow and low-NOx combustion within a 75 t/h coal-fired grate furnace / Z. Ge et al. // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Т. 256. – Р. 124076.
2. Бусыгин С.В. Моделирование процесса рециркуляции дымовых газов энергетического котла с применением комплекса программ для оценки эффективности мероприятий направленных на подавление выбросов NOx при сжигании природного газа на ТЭС / С. В. Бусыгин / С.В. Бусыгин // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики: Материалы I Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Ульяновск, 06-07 октября 2021 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2021. – С. 176-179.
3. Effects of flue gas recirculation on self-excited combustion instability and NOx emission of a premixed flame / D. Pan et al // Thermal Science and Engineering Progress. – 2022. – Т. 30. – Р. 101252.
4. Junwei S. Influence of Different Flue Gas Recirculation Schemes on 1000 MW Ultra-supercritical Double Reheat Boiler [J] / S. Junwei, D. Weibao, Y. Weiping // Journal of engineering for thermal energy and power. – 2019. – № 34(5). – Р. 49-56.
5. Умыржан Н.Н. Рециркуляция дымовых газов как способ эффективного регулирования топочного процесса / Н.Н. Умыржан, А.И. Мануленко, Т.Н. Умыржан // Энергия-2022. Теплоэнергетика: Семнадцатая всероссийская (девятая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6 т., Иваново, 11-13 мая 2022 года. Том 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2022. – С. 18.
6. Characteristics and flame appearance of oxy-fuel combustion using flue gas recirculation / M. Abdelaal et al // Fuel. – 2021. – Т. 297. – Р. 120775.
7. Ahn J. Combustion characteristics of 0.5 MW class oxy-fuel FGR (flue gas recirculation) boiler for CO2 capture / J. Ahn, H.J. Kim // Energies. – 2021. – Т. 14, № 14. – Р. 4333.
8. Рециркуляция дымовых газов как способ внедрения экологических технологий в энергетических котлах / Н. Умыржан и др. // Вестник КазАТК. – 2021. – Т. 119, № 4. – С. 113-120.
9. Патент № 2761254 С1 Российская Федерация, МПК F23C 13/00. Устройство рециркуляции дымовых газов: № 2021107646: заявл. 22.03.2021: опубл. 06.12.2021 / С.В. Александров.
10. Zhu Y. Combustion characteristic study with a flue gas internal and external double recirculation burner / Y. Zhu, C. Wang, X. Chen // Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. – 2021. – Т. 162. – Р. 108345.

11. Experimental study on NO_x formation characteristics in flue gas recirculation combustion process of S-CO₂ coal-fired boiler / H. Li et al // *Combustion Science and Technology*. – 2024. – Т. 196, № 18. – P. 5048-5063.
12. Khorampoor S. Efficient natural gas combustion and NO_x reduction: A novel application of simultaneous over-fire air (OFA) and flue gas recirculation (FGR) in a 250 MW opposed firing steam power plant boiler / S. Khorampoor, S. Sanaye // *Energy Reports*. – 2024. – Т. 12. – P. 2573-2587.
13. Numerical Studies of the Influence of Flue Gas Recirculation into Primary Air on NO_x Formation, CO Emission, and Low-NO_x Waterwall Corrosion in the OP 650 Boiler / B. Hernik et al // *Energies*. – 2024. – Т. 17, № 9. – P. 2227.
14. Research on the effect of the flue gas recirculation on the combustion and operating economy of circulating fluidized bed boiler / G. Xie et al // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing. – 2023. – Т. 1171, № 1. – P. 012005.
15. Numerical Study on Effect of Flue Gas Recirculation and Co-Firing with Biomass on Combustion Characteristics in Octagonal Tangentially Lignite-Fired Boiler / J. Du et al // *Energies*. – 2024. – Т. 17, № 2. – P. 475.
16. СТ РК ГОСТ Р ИСО 10849–2010 (ГОСТ Р ИСО 10849-2006). Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации оксидов азота. Характеристика автоматических методов измерений в условиях применения. - Астана: Комитет технического регулирования и метрологии Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, 2010. – Введен в действие с 01.01.2012. – Режим доступа: https://prg.kz/document/?doc_id=31924024 (дата обращения: 27.02.2026).

References

1. Effect of the coal-spreading air on airflow and low-NO_x combustion within a 75 t/h coal-fired grate furnace / Z. Ge et al. // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Т. 256. – R. 124076. (In English).
2. Busygin S.V. Modelirovanie processa recirkulyacii dymovyh gazov energeticheskogo kotla s primeneniem kompleksa programm dlya ocenki effektivnosti meropriyatij napravlennyh na podavlenie vybrosov NO_x pri szhiganii prirodnogo gaza na TES / S. V. Busygin / S.V. Busygin // *Razvitie metodov prikladnoj matematiki dlya resheniya mezhdisciplinarnykh problem energetiki: Materialy I Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Ul'yanovsk, 06-07 oktyabrya 2021 goda*. – Ul'yanovsk: Ul'yanovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021. – S. 176-179. (In Russian).
3. Effects of flue gas recirculation on self-excited combustion instability and NO_x emission of a premixed flame / D. Pan et al // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2022. – Т. 30. – R. 101252. (In English).
4. Junwei S. Influence of Different Flue Gas Recirculation Schemes on 1000 MW Ultra-supercritical Double Reheat Boiler [J] / S. Junwei, D. Weibao, Y. Weiping // *Journal of engineering for thermal energy and power*. – 2019. – № 34(5). – R. 49-56. (In English).
5. Umyrzhhan N.N. Recirkulyaciya dymovyh gazov kak sposob effektivnogo regulirovaniya topochnogo processa / N.N. Umyrzhhan, A.I. Manulenko, T.N. Umyrzhhan // *Energiya-2022. Teploenergetika: Semnadcataya vs Rossijskaya (devyataya mezhdunarodnaya) nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenykh. V 6 t., Ivanovo, 11-13 maya 2022 goda. Tom 1*. – Ivanovo: Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet im. V.I. Lenina, 2022. – S. 18. (In Russian).
6. Characteristics and flame appearance of oxy-fuel combustion using flue gas recirculation / M. Abdelaal et al // *Fuel*. – 2021. – Т. 297. – R. 120775. (In English).
7. Ahn J. Combustion characteristics of 0.5 MW class oxy-fuel FGR (flue gas recirculation) boiler for CO₂ capture / J. Ahn, H.J. Kim // *Energies*. – 2021. – Т. 14, № 14. – R. 4333. (In English).
8. Recirkulyaciya dymovyh gazov kak sposob vnedreniya ekologicheskikh tekhnologij v energeticheskikh kotlah / N. Umyrzhhan i dr. // *Vestnik KazATK*. – 2021. – Т. 119, № 4. – S. 113-120. (In Russian).
9. Patent № 2761254 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK F23C 13/00. Ustrojstvo recirkulyacii dymovyh gazov: № 2021107646: zayavl. 22.03.2021: opubl. 06.12.2021 / S.V. Aleksandrov. (In Russian).
10. Zhu Y. Combustion characteristic study with a flue gas internal and external double recirculation burner / Y. Zhu, C. Wang, X. Chen // *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. – 2021. – Т. 162. – R. 108345. (In English).

11. Experimental study on NOX formation characteristics in flue gas recirculation combustion process of S-CO₂ coal-fired boiler / N. Li et al // Combustion Science and Technology. – 2024. – T. 196, № 18. – R. 5048-5063. (In English).
12. Khorampoor S. Efficient natural gas combustion and NO_x reduction: A novel application of simultaneous over-fire air (OFA) and flue gas recirculation (FGR) in a 250 MW opposed firing steam power plant boiler / S. Khorampoor, S. Sanaye // Energy Reports. – 2024. – T. 12. – R. 2573-2587. (In English).
13. Numerical Studies of the Influence of Flue Gas Recirculation into Primary Air on NO_x Formation, CO Emission, and Low-NO_x Waterwall Corrosion in the OP 650 Boiler / V. Hernik et al // Energies. – 2024. – T. 17, № 9. – R. 2227. (In English).
14. Research on the effect of the flue gas recirculation on the combustion and operating economy of circulating fluidized bed boiler / G. Xie et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. – 2023. – T. 1171, № 1. – R. 012005. (In English).
15. Numerical Study on Effect of Flue Gas Recirculation and Co-Firing with Biomass on Combustion Characteristics in Octagonal Tangentially Lignite-Fired Boiler / J. Du et al // Energies. – 2024. – T. 17, № 2. – R. 475. (In English).
16. ST RK GOST R ISO 10849-2010 (GOST R ISO 10849-2006). Vybrosoy stacionarnykh istochnikov. Opredelenie massovoj koncentracii oksidov azota. Harakteristika avtomaticheskikh metodov izmerenij v usloviyah primeneniya. – Astana: Komitet tekhnicheskogo regulirovaniya i metrologii Ministerstva industrii i novykh tekhnologij Respubliki Kazahstan, 2010. – Vveden v dejstvie s 01.01.2012. – Rezhim dostupa: https://prg.kz/document/?doc_id=31924024 (data obrashcheniya: 27.02.2026). (In Russian).

A.P. Хажидинова¹, К.С. Зарыкбаева*, Е.Н. Мясоедова¹, А.Е. Сатыбалдинова¹, С.Л. Елистратов²

¹Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20А

²Новосібір мемлекеттік техникалық университеті,

630073, Ресей Федерациясы, Новосибирск қаласы, К. Маркс даңғылы, 20, 1-ғимарат

*e-mail: kamshat85.kz@mail.ru

ТҮТІН ГАЗДАРЫН ҚАЙТА АЙНАЛДЫРУ НЕГІЗІНДЕ КӨМІР ҚАЗАНЫНЫҢ ЖҰМЫСЫН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Түтін газдарын қайта айналдыру (ТГҚА) жалын температурасы мен жұмыс қоспасының құрамын басқару арқылы азот оксидтерінің шығарындыларын бір мезгілде төмендетуге және көмір қазандықтарының энергетикалық тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін тиімді әдіс болып табылады. Бұл жұмыста Қазақстандағы ТЭЦ-1 станциясының Е-90-3,9/440 қазанында Қаражыра кен орнының Д маркалы көмірін жағу кезінде ТГҚА қолданудың есептік-аналитикалық зерттеуі жүргізілді. Зерттеудің мақсаты – эксплуатациялық шектеулер шегінде КПД бруттоны барынша арттыра отырып, NO_x мөлшерін төмендетуді қамтамасыз ететін ТГҚА-ның рационалды дәрежесін анықтау. Әдістеме қазанның жылулық балансының математикалық моделіне және ТГҚА қосылғанға дейін/кейінгі режимдік деректерді өңдеуге негізделген; қайта айналдыру үлесін өзгерту кезінде түтін газдарының құрамы мен жылутехникалық шығындардың өзгерістері бағаланды.

Зерттеу нәтижелері бойынша, қарастырылған ТГҚА дәрежелері диапазонында қайта айналдырудың артуы есептік КПД бруттоның өсуімен және NO_x концентрациясының төмендеуімен қатар жүретіні анықталды: ТГҚА 1%-ға артқанда КПД 0,25%-ға өсіп, ал NO_x 9 мг/м³-ке азаяды. Рационалды көрсеткіштер ТГҚА ≈ 20% кезінде алынды, бұл есептік КПД брутто 95,5% мәніне және базалық режиммен салыстырғанда NO_x-тің 30% төмендеуіне сәйкес келеді. Алынған нәтижелер ТГҚА-ны Қазақстанның көмірмен жұмыс істейтін ЖЭО/ЖЭС-терінің экологиялық және пайдалану тиімділігін арттыруға арналған технологиялық шешім ретінде қолданудың орындылығын растайды.

Түйін сөздер: түтін газының рециркуляциясы, көмірмен жұмыс істейтін қазандықтар, азот оксидінің шығарындылары, жылу тиімділігі, энергияны оңтайландыру, көмірдің жануы.

A.R. Khazhidinova¹, K.S. Zarykbayeva*, E.N. Myasoedova¹, A.E. Satybaldinova¹, S.L. Elistratov²

¹Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.

²Novosibirsk State Technical University,

630073, Russian Federation, Novosibirsk, 20 Karl Marx Avenue, Building 1

*e-mail: kamshat85.kz@mail.ru

ECOLOGICAL AND ENERGY OPTIMIZATION OF A COAL-FIRED BOILER OPERATION BASED ON FLUE GAS RECIRCULATION

Flue gas recirculation (FGR) is an effective approach for simultaneously reducing nitrogen oxide emissions and improving the energy performance of coal-fired boilers by controlling flame temperature and the composition of the working mixture. This paper presents a computational and analytical study of FGR application to the E-90-3.9/440 boiler at TPP-1 under firing of D-grade coal from the Karazhyra open-pit mine. The aim is to determine a rational FGR ratio that ensures NO_x reduction while maximizing gross boiler efficiency within operational constraints. The methodology is based on a mathematical boiler heat-balance model and processing of operational data before and after FGR activation; changes in flue gas composition and heat losses were assessed as the recirculation fraction was varied.

The results show that, within the considered FGR range, increasing recirculation is associated with a rise in calculated gross efficiency and a decrease in NO_x concentration: a 1% increase in FGR raises gross efficiency by 0.25%, while NO_x decreases by 9 mg/m³. Rational performance is achieved at FGR ≈ 20%, corresponding to a calculated gross efficiency of 95.5% and a 30% reduction in NO_x relative to the baseline mode. The findings confirm the feasibility of FGR as a technological solution for enhancing the environmental and operational performance of coal-fired thermal power plants in Kazakhstan.

Key words: flue gas recirculation, coal-fired boiler, nitrogen oxide emissions, thermal efficiency, energy optimization, coal combustion.

Сведения об авторах

Акбота Рыспековна Хажидинова – PhD, и.о. ассоциированного профессора кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: khazhidinova1991@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8802-1559>.

Камшат Серикхановна Зарыкбаева* – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8115-357X>.

Екатерина Николаевна Мясоедова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2142-3483>.

Айгерим Еркеновна Сатыбалдинова – магистр технических наук, преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7610-9058>.

Сергей Львович Елистратов – доктор технических наук, профессор кафедры «Тепловых электрических станций», Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация; e-mail: elistratov@corp.nstu.ru.

Авторлар туралы мәліметтер

Акбота Рыспековна Хажидинова – PhD, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессорының м.а., Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: khazhidinova1991@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8802-1559>.

Камшат Серикхановна Зарыкбаева* – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8115-357X>.

Екатерина Николаевна Мясоедова – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2142-3483>.

Айгерим Еркеновна Сатыбалдинова – техника ғылымдарының магистрі, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7610-9058>.

Сергей Львович Елистратов – техника ғылымдарының докторы, «Жылу электр станциялары» кафедрасының профессоры, Новосибир мемлекеттік техникалық университеті, Ресей Федерациясы; e-mail: elistratov@corp.nstu.ru.

Information about the authors

Akbota Ryspekovna Khazhidinova – PhD, Acting Associate Professor, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: khazhidinova1991@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8802-1559>.

Kamshat Serikhanovna Zarykbayeva* – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kamshat.ru@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8115-357X>.

Ekaterina Nikolaevna Myasoedova – Master of Technical Sciences, Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Kate_white89@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2142-3483>.

Aigerim Erkenovna Satybaldinova – Master of Technical Sciences, Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7610-9058>.

Sergey Lvovich Elistratov – doctor of technical sciences, professor of the Department of «Heat Power Plants», Novosibirsk State Technical University, Russian Federation; e-mail: elistratov@corp.nstu.ru.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Поступила после доработки 27.02.2026

Принята к публикации 10.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-62](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-62)



МРНТИ: 29.17.19

А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан*, А.А. Бектемисов, Ж.Қ. Акишов, Д.Н. Нурғалиев

Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинка, 20 А
*e-mail: timirlan-95@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Аннотация: Растительные масла рассматриваются как перспективные базовые жидкости для наномасел, однако их практическое применение определяется условием между ростом теплопроводности и увеличением вязкостных потерь. В работе экспериментально исследовано влияние гибридной дисперсной фазы $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ на теплопроводность $\lambda(T)$ и кинематическую вязкость $\nu(T)$ наномасел на основе оливкового и подсолнечного масел. Наномасла получали двухэтапным методом при суммарной концентрации твердой фазы 2 vol.% с ультразвуковой гомогенизацией; теплопроводность измеряли анализатором TEMPOS, а кинематическую вязкость определяли капиллярной вискозиметрией (ВПЖ-2) в диапазоне 20-50 °C (293-323 K).

Установлено, что для базовых масел ν закономерно уменьшается с повышением температуры, тогда как введение $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ приводит к росту кинематической вязкости на 17,5% по сравнению с соответствующими базовыми маслами во всём диапазоне температур. Теплопроводность базовых масел изменяется слабо и демонстрирует умеренное снижение при нагреве, а добавление $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ повышает λ на 5%. Полученные зависимости $\lambda(T)$ и $\nu(T)$ могут быть использованы для обоснования выбора состава наномасла с учётом баланса усиления теплопереноса и роста гидравлических потерь.

Ключевые слова: растительные масла; наномасло; гибридные наночастицы; TiO_2 ; Al_2O_3 ; теплофизические свойства; температурная зависимость

Введение

Растительные масла рассматриваются как перспективные базовые жидкости для наножидкостей благодаря биоразлагаемости, доступности и выраженным смазывающим свойствам. Вместе с тем их практическая применимость определяется соотношением между возможным усилением теплопереноса и увеличением вязкостных потерь, однако введение наночастиц, как правило, повышает эффективную теплопроводность, однако нередко сопровождается ростом вязкости, особенно при повышенных концентрациях и недостаточно устойчивой дисперсии.

Существенную роль играет температура, в рабочем диапазоне вязкость растительных масел закономерно уменьшается при нагреве, тогда как температурная зависимость теплопроводности определяется составом базовой жидкости и дисперсной фазы и поэтому должна быть установлена либо прямыми экспериментальными измерениями, либо на основе согласованного массива опорных данных. В литературе представлены как исследования термофизических свойств растительных масел, модифицированных гибридными оксидными добавками, так и работы, посвящённые наномаслам для технологических применений (например, MQL), где ключевыми характеристиками выступают $\lambda(T)$ и $\nu(T)$ [1-4].

А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан, А.А. Бектемисов, Ж.Қ. Акишов, Д.Н. Нурғалиев, 2026