

Investigation of the Efficiency of the Flue Gas Recirculation during Natural Gas Combustion in the Boiler Furnace

Kocharyan E.V., Bedilo A.V., Arushanyan R.R., Shelest N.A.

¹Kuban State Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to model and analyze the process of combustion of natural gas in a boiler furnace in a mixture with oxygen-enriched air while recirculating flue gases in various ways. To achieve this goal, the following objectives were addressed: the development of a mathematical model of a fire tube boiler furnace for operation during the combustion of natural gas in a mixture of air with pure oxygen and recirculated flue gases, a numerical study of the combustion process, including the temperature in the furnace and the composition of combustion products, depending on the method of recirculation. Combustion simulation was carried out in the computational fluid dynamics package OpenFOAM, using the XiFoam solver. The most important result is to obtain a formula for calculating the required degree of dryness of the recirculating flue gases, depending on the recirculation ratio and NOx emission limits. In addition, it was confirmed that the method of organizing flue gas recirculation is more efficient by feeding them in a mixture with an oxidizing agent going to combustion, compared to other methods, even under conditions of oxygen fuel combustion. The study was conducted for the recirculation ratio in the range from 0 to 50% with varying degrees of flue gas dryness. It is shown that controlling the moisture concentration in recirculated flue gases is an effective and technologically flexible tool for optimizing the natural gas combustion process in power boilers operating using oxygen combustion technology. The proposed approximation model makes it possible to estimate the required degree of dehumidification of recirculating gases at the design and commissioning stage, adapting the technology to the specific operating conditions of the power boiler and the requirements of environmental legislation.

Keywords: oxygen combustion, fuel, emissions, recirculation, boiler, exhaust gases, furnace, flame, carbon dioxide, temperature, degree of dryness, model.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2026.3-71.11>

UDC: 621.182

Investigarea eficienței recirculării gazelor de ardere în timpul arderii gazelor naturale în cuptorul cazanului

Kociaryan E.V., Bedilo A.V., Aruşanian R.R., Şelest N.A.

Universitatea Tehnologică de Stat Kuban, Krasnodar, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este de a modela și analiza procesul de ardere a gazelor naturale într-un cuptor cazan într-un amestec cu aer îmbogățit cu oxigen, în timp ce gazele de ardere sunt recirculate în diverse moduri. Pentru a atinge acest obiectiv, au fost abordate următoarele obiective: dezvoltarea unui model matematic al unui cuptor cazan cu tuburi de fum pentru funcționarea în timpul arderii gazelor naturale într-un amestec de aer cu oxigen pur și gaze de ardere recirculate, un studiu numeric al procesului de ardere, inclusiv temperatura din cuptor și compoziția produselor de ardere, în funcție de metoda de recirculare. Simularea arderii a fost efectuată în pachetul de dinamică computațională a fluidelor OpenFOAM, utilizând solverul XiFoam. Cel mai important rezultat este obținerea unei formule pentru calcularea gradului necesar de uscare a gazelor de ardere recirculate, în funcție de raportul de recirculare și de limitele de emisie de NOx. În plus, s-a confirmat că metoda de organizare a recirculării gazelor de ardere este mai eficientă prin alimentarea lor în amestec cu un agent oxidant care merge la ardere, comparativ cu alte metode, chiar și în condiții de ardere a combustibilului cu oxigen. Studiul a fost efectuat pentru raportul de recirculare în intervalul de la 0 la 50%, cu grade variabile de uscare a gazelor de ardere. Se demonstrează că controlul concentrației de umiditate din gazele de ardere recirculate este un instrument eficient și flexibil din punct de vedere tehnologic pentru optimizarea procesului de ardere a gazelor naturale în cazanele de putere care funcționează folosind tehnologia de ardere cu oxigen. Modelul de aproximare propus permite estimarea gradului necesar de deumidificare a gazelor de ardere recirculate în etapa de proiectare și punere în funcțiune, adaptând tehnologia la condițiile specifice de funcționare ale cazanului de putere și la cerințele legislației de mediu.

Cuvinte-cheie: ardere cu oxigen, combustibil, emisii, recirculare, cazan, gaze de eșapament, cuptor, flacără, dioxid de carbon, temperatură, grad de uscare, model.

Исследование эффективности рециркуляции дымовых газов при горении природного газа в топке жаротрубного котла

Кочарян Е.В., Бедило А.В., Арушанян Р.Р., Шелест Н.А.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является моделирование и анализ процесса сжигания природного газа в топке котла в смеси с воздухом, обогащенном кислородом, при организации рециркуляции дымовых газов различными способами. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: разработка математической модели топки жаротрубного котла для работы при сжигании природного газа в смеси воздуха с чистым кислородом и рециркулируемыми дымовыми газами, численное исследование процесса горения в том числе температуры в топке и состава продуктов сгорания в зависимости от способа рециркуляции. Моделирование горения проводилось в пакете вычислительной гидродинамики OpenFOAM, с использованием решателя XiFoam. Наиболее важным результатом является получение формулы для вычисления необходимой степени сухости рециркулирующих дымовых газов в зависимости от степени рециркуляции и ограничений по эмиссии NOx. Кроме того, получено подтверждение большей эффективности метода организации рециркуляции дымовых газов путем подачи их в смеси с окислителем, идущим на горение, по сравнению с другими методами, даже в условиях кислородного сжигания топлива. Исследование проводилось для степени рециркуляции в диапазоне от 0 до 50% с разной степенью сухости дымовых газов. Показано, что управление концентрацией влаги в рециркулируемых дымовых газах является эффективным и технологически гибким инструментом оптимизации процесса сжигания природного газа в энергетических котлах, работающих по технологии кислородного сжигания. Предложенная аппроксимационная модель позволяет на этапе проектирования и режимной наладки оценить необходимую глубину осушения рециркулирующих газов, адаптируя технологию к конкретным условиям работы энергетического котла и требованиям природоохранного законодательства.

Ключевые слова: кислородное сжигание, топливо, выбросы, рециркуляция, котел, уходящие газы, топка, факел, углекислый газ, температура, степень сухости, модель.

ВВЕДЕНИЕ

Высокие темпы индустриализации и увеличение численности населения приводят к росту потребления ископаемого топлива, что сопровождается значительными выбросами продуктов его горения, являющихся одним из основных источников загрязнения атмосферы. В настоящее время идеи совершенствования энергетической техники осуществляются как за счет улучшения конструкций агрегатов, так и самого технологического процесса, протекающего в них. Одна из прогрессивных технологий, позволяющих уменьшить выбросы токсичных веществ и парниковых газов в энергетической отрасли – это кислородное сжигание топлива (Oxyfuel Combustion) [1, 2, 3, 4]. В этом случае топливо сжигается в воздухе, обогащенном кислородом или даже в, по существу, чистом кислороде. Таким образом, продукты сгорания содержат главным образом углекислый газ и водяной пар. При реализации данного метода необходимо обеспечить рециркуляцию части дымовых газов, вводя их в зону горения так, чтобы создать необходимые температурные условия. Исследования в данной области активно развиваются [5, 6, 7, 8, 9]. Однако необходимо решить множество проблем, прежде чем эти технологии сжигания смогут получить

широкое распространение в промышленности, поскольку различия в физических свойствах и химических характеристиках CO_2 и N_2 могут привести к важным различиям в структуре пламени. Важным моментом эффективной организации кислородного сжигания топлива является рациональная организация рециркуляции продуктов горения в топку котла [10, 11, 12, 13]. Для этого необходимо получить больше информации о характеристиках горения различных видов топлива в различных средах O_2/CO_2 .

Принудительную рециркуляцию продуктов горения достаточно давно широко применяют при организации работы котлоагрегатов при сжигании топлива в смеси с воздухом. В зависимости от целей выбирается место и способ ввода рециркулирующих газов в топку. Имеется четыре основных способа: в нижнюю часть топки, в верхнюю часть топки, избирательно и в смеси с воздухом, идущим на горение.

При подаче 10 – 40 % рециркулируемых газов решаются следующие задачи, в том числе такие как [14]:

- регулирование температуры перегрева пара (для паровых котлов) в широком диапазоне нагрузок в условиях сжигания различного топлива при заданных расходах воздуха;

- защита топочных поверхностей нагрева от тепловых перегрузок и вредного коррозионного воздействия;

- снижение запаса поверхностей нагрева;
- снижение температурной неравномерности в выходном сечении топок;
- снижение содержания атомарного кислорода в топке, определяющего условия низкотемпературной коррозии;
- подавление генерации NOx.

При подаче рециркулирующих газов в нижнюю часть топки (для жаротрубных котлов – в начальную зону топки) уменьшается тепловосприятие, а температура на выходе из топки зависит от ее тепловой нагрузки. Подача рециркулирующих газов в верхнюю часть топки (для жаротрубных котлов – в хвостовую часть топки) не влияет на радиационный теплообмен в ней, но позволяет существенно снизить габариты топочной камеры. «Душирующая» рециркуляция (подача газов через щели вокруг горелочного устройства) для омывания радиационных поверхностей) уменьшает также суммарное тепловосприятие.

Важнейшее преимущество рециркуляции – возможность воздействия на состав газов в топке и состав продуктов полного горения, что достигается воздействием на температуру в зоне активного горения. Например, образование NOx происходит в зоне максимальных температур (при температуре ниже 1450 °C образование их незначительно) и высокой концентрации окислителя [13]. На этот процесс влияет и время пребывания азотосодержащих частиц в высокотемпературной зоне активного горения [14, 15, 16]. Наибольшее снижение образования NOx наблюдается при подмешивании рециркулирующих газов к воздуху, подаваемому в горелки. Но применение рециркуляции имеет и негативные стороны:

- необходимость дополнительных капиталовложений на сооружение установок рециркуляции;
- повышение расхода электроэнергии на дымосос (вентилятор) с учетом необходимости преодоления сопротивления газового тракта;
- снижение надежности теплогенерирующей установки при организации рециркуляции из-за высокой температуры, коррозионной активности дымовых газов;

- некоторое повышение температуры уходящих газов и снижение КПД котлоагрегата.

Ввиду того, что при организации кислородного сжигания существенно меняется состав среды, в которой происходит процесс окисления топлива, для проверки эффективности существующих технологий рециркуляции в новых условиях, а также поиска иных технологических решений организации рециркуляции дымовых газов в теплогенерирующих установках, адаптированных к условиям кислородного сжигания топлива, требуются дополнительные исследования.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью настоящей работы является изучение характеристик горения природного газа в потоке воздуха, обогащенного кислородом, при организации рециркуляции дымовых газов различными способами. Были проведены двумерные численные расчеты с подробным кинетическим механизмом для выяснения влияния CO₂ в качестве разбавителя на процесс горения метана и стабилизацию факела. Было учтено, что процессы сжигания на воздухе и при кислородно-топливном горении различаются. При сжигании воздушно-топливной смеси в газообразных продуктах сгорания преобладает N₂, тогда как при сжигании кислородно-топливной смеси в продуктах сгорания большую долю составляет CO₂.

Новые условия сгорания топлива оказывают влияние и на процесс образования NOx. Рециркуляция дымовых газов влияет на концентрацию азота, время пребывания топливной смеси в топке и температурный режим горения. В качестве дополнительной задачи необходимо провести оценку концентрации оксидов азота на выходе из топки в зависимости от степени сухости (удаление паров H₂O) рециркулирующих дымовых газов.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование проводилось для трех схем рециркуляции дымовых газов: 1 – подача рециркулирующих дымовых газов через горелку совместно с топливовоздушной смесью; 2 – «душирующая» рециркуляция; 3 – подача рециркулирующих дымовых газов в хвостовую часть топки.

Моделирование предварительно смешанного горения было выполнено в пакете вычислительной гидродинамики OpenFOAM, с использованием решателя XiFoam. Термодинамические и транспортные свойства смеси, а также их температурные полиномиальные зависимости рассчитывались в библиотеке химической кинетики Cantera с детальной кинетической моделью горения природного газа GRI-Mech 3.0. Использована модель замыкания турбулентности $k-\omega$ SST для уравнений гидродинамики и абсолютная энтальпия для уравнений энергии. Для повышения численной устойчивости моделирования предварительно решалась гидродинамическая задача без учета протекания реакций, её результаты использовались в качестве начальных условий для задачи с реакциями. Для корректного учета скоростного профиля

смеси на входе в топку отдельно решалась задача о течении газа в длинной трубе ($L > 10D$), а затем профиль импортировался в основную задачу. Структурированная расчетная сетка генерировалась утилитой blockMesh со средним размером ячеек $2,5 \times 2,5$ мм, что обеспечивало достаточно малое значение y^+ в пристеночном слое и разрешение возникающих градиентов. Решалась квазистационарная задача с псевдовременным шагом, критерием остановки являлся выход невязок на стабильный уровень.

Для ускорения вычислений задача была сведена к двумерной осесимметричной. Вход для «душирующей» подачи дымовых газов и выход в дымогарные трубы были заменены щелевыми прорезями эквивалентной площади для сохранения осевой симметрии (рис. 1).

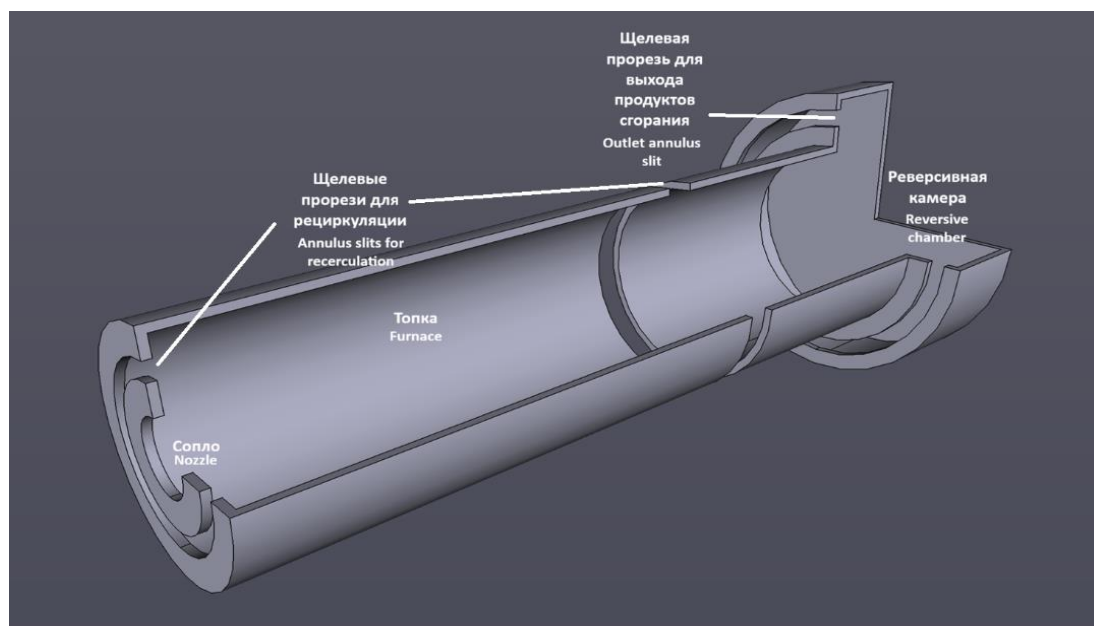


Рис. 1. Топка котлоагрегата вместе с реверсивной камерой.

Fig. 1. Boiler furnace with reversive chamber.

Были смоделированы следующие случаи (во всех вариантах наружная температура стенки жаровой трубы поддерживалась постоянной и равной 60°C (температура теплоносителя), температура природного газа, воздуха и кислорода составляла 37°C , а температура рециркулирующих дымовых газов - 220°C): 1) Смесь, состоящая из природного газа (9.5 %), кислорода (5.4 %), воздуха (63.4 %) и рециркулируемых дымовых газов (21.7 %) подавалась через сопло горелки с расходом $3.54 \text{ м}^3/\text{с}$.

2) Смесь, состоящая из природного газа (12.1 %), кислорода (6.9 %) и воздуха (81.0 %) подавалась через сопло с расходом $2.77 \text{ м}^3/\text{с}$, а рециркулирующие дымовые газы подавались через щель вокруг сопла с расходом $0.77 \text{ м}^3/\text{с}$.

3) Рециркулирующие газы подавались через щель в хвостовой части топки, с сохранением расхода компонентов по п.2.

Расстояние от начала топки до места ввода рециркулируемых газов через щелевое отверстие (обозначим его L_R) менялось в пределах 3.5-4.5 м. Общая длина топки составляет 5.36 м, а диаметр 1.34 м.

Дополнительная информация о составе компонентов:

- природный газ: метан 93.8 %, этан 2 %, пропан 0.8 %, азот 3.4 %.

- рециркулирующие дымовые газы: азот 63%, углекислый газ 12.1 %, водяной пар 24.9 %.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате моделирования получены контуры температуры (рис. 2), линии тока (рис. 3), контуры концентраций CH_4 , O_2 , CO_2 . На рис. 5-6 приведены результаты моделирования для следующих случаев: а) - рециркуляция газов через сопло; б) - «душирующая» подача рециркулирующих газов; в) - рециркуляция газов в хвостовую часть топки при $L_R = 3.5$ м.

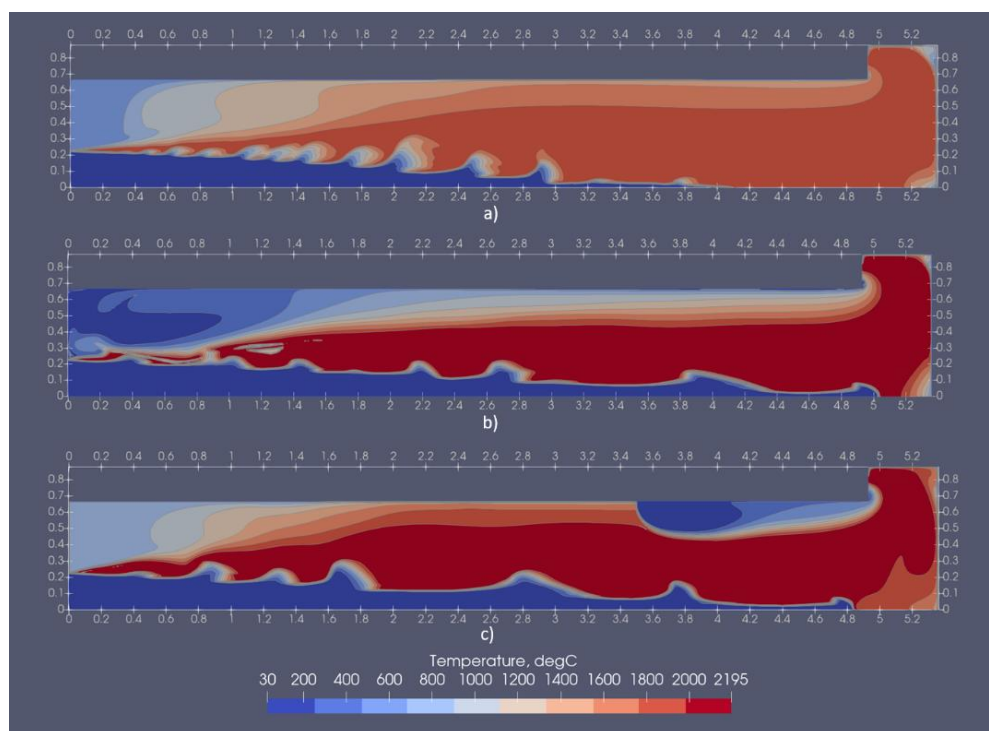


Рис. 2. Контуры температуры.

Fig. 2. Temperature distribution.

Как видно из результатов, рециркуляция 21.7 % от общего объема дымовых газов не оказывает подавляющее воздействие на процесс возгорания метана или значительной дестабилизации факела.

Из рис. 3 видно, что при подмешивании дымовых газов в поступающую из сопла топливно-воздушную смесь адиабатная температура горения снижается с 2000 °C до 1700 °C по сравнению с «душирующей» подачей дымовых газов или их подачей в хвостовую часть топки. Это значительно снижает эмиссию NO_x в отходящие дымовые газы. Значительная разница в температурах горения может быть объяснена большей долей кислорода в топливно-воздушной смеси, в случае, когда дымовые газы подаются отдельно (б и в).

На основе результатов моделирования можно сформулировать еще один недостаток раздельной подачи дымовых газов: в тех местах, где поток относительно холодных дымовых газов сталкивается с фронтом пламени, происходит локальное нарушение процессов горения. Особенно хорошо это заметно при «душирующей» подаче дымовых газов («рваные» контуры температуры на рис. 2б). Кроме того, резкое охлаждение фронта пламени приводит к торможению реакций в нем, о чем свидетельствует появление следов кислорода и несгоревшего топлива в отходящих струях дымовых газов (рис. 4б, 4с, 5б, 5с). Указанное явление также может привести к образованию сажи, с последующим её отложением на теплообменных поверхностях. Данные результаты подтверждаются исследованиями других авторов [17,18, 19, 20].

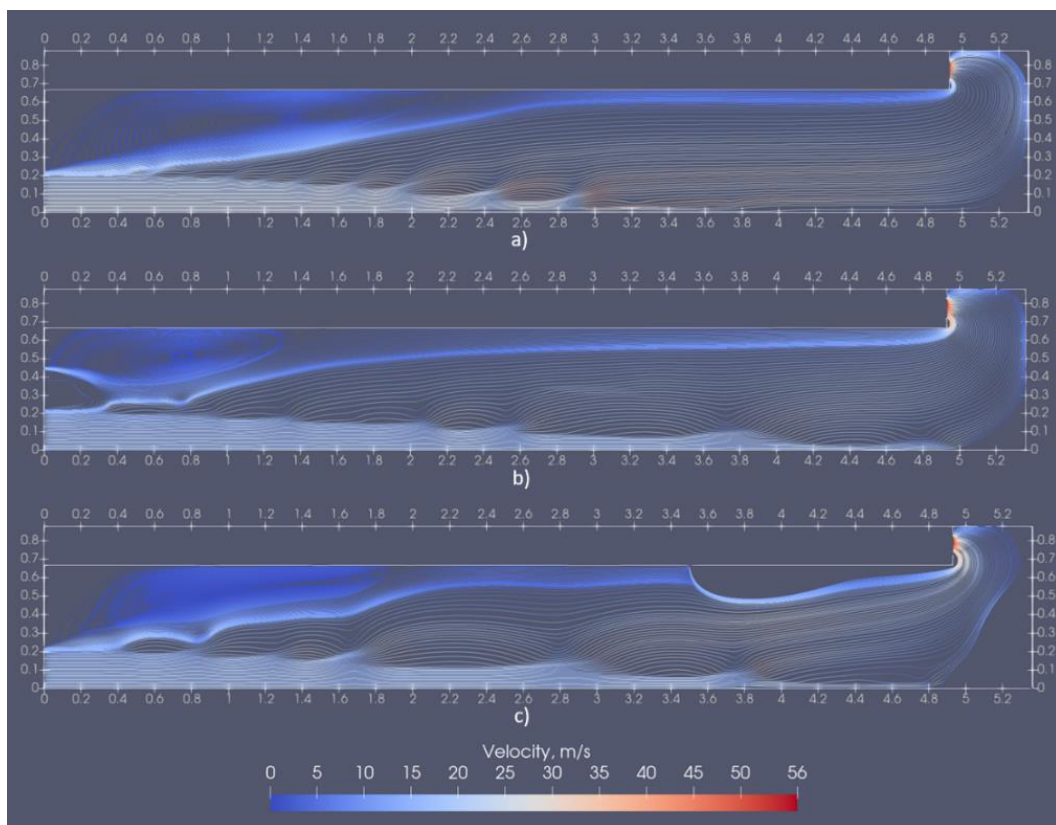


Рис. 3. Линии тока.
Fig. 3. Streamlines.

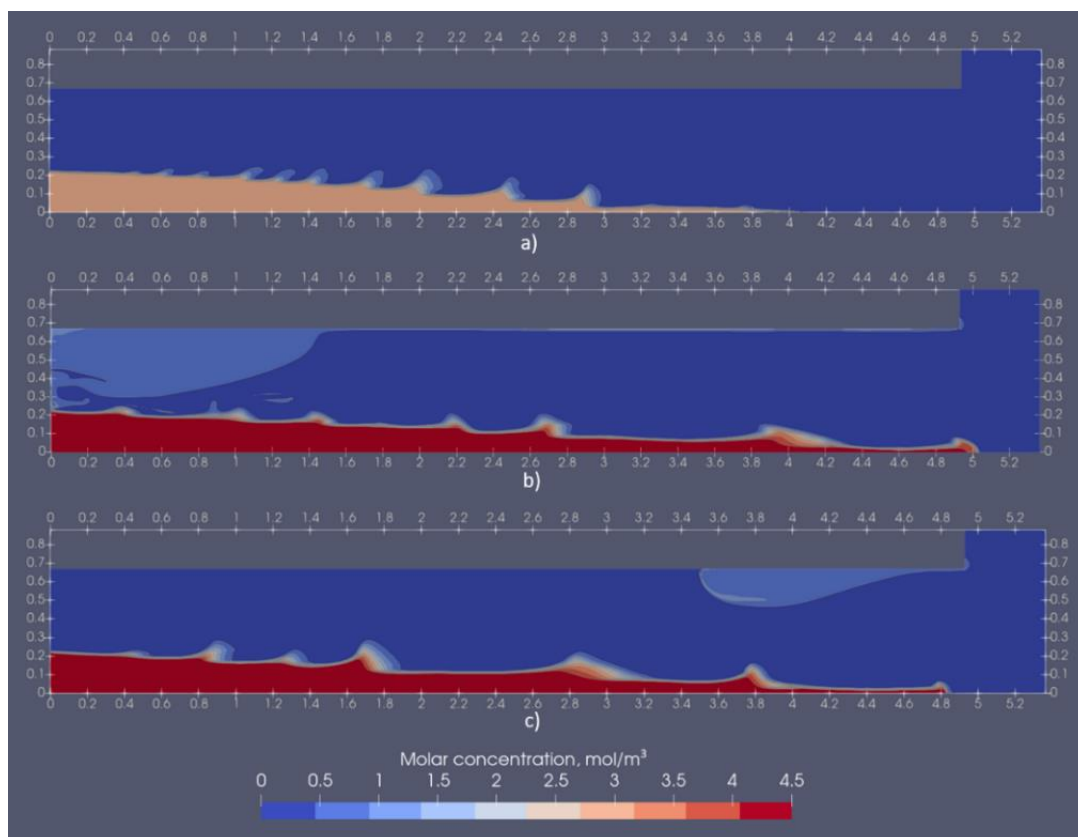


Рис. 4. Контуры молярной концентрации метана.
Fig. 4. Molar concentration of methane.

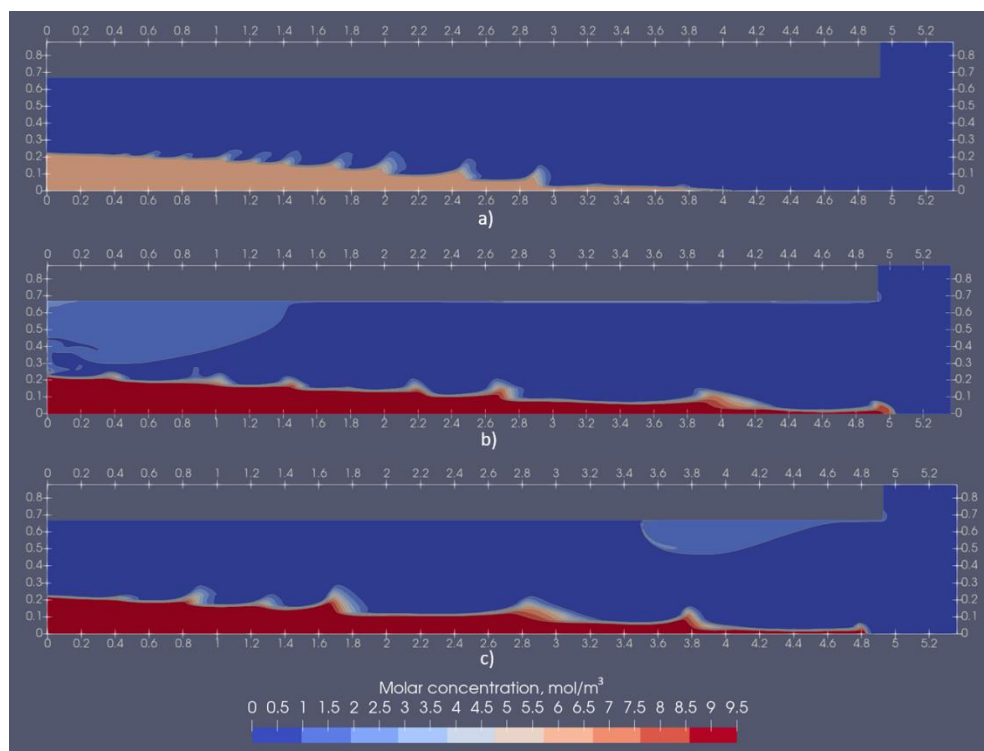


Рис. 5. Контуры молярной концентрации кислорода.
Fig. 5. Molar concentration of oxygen.

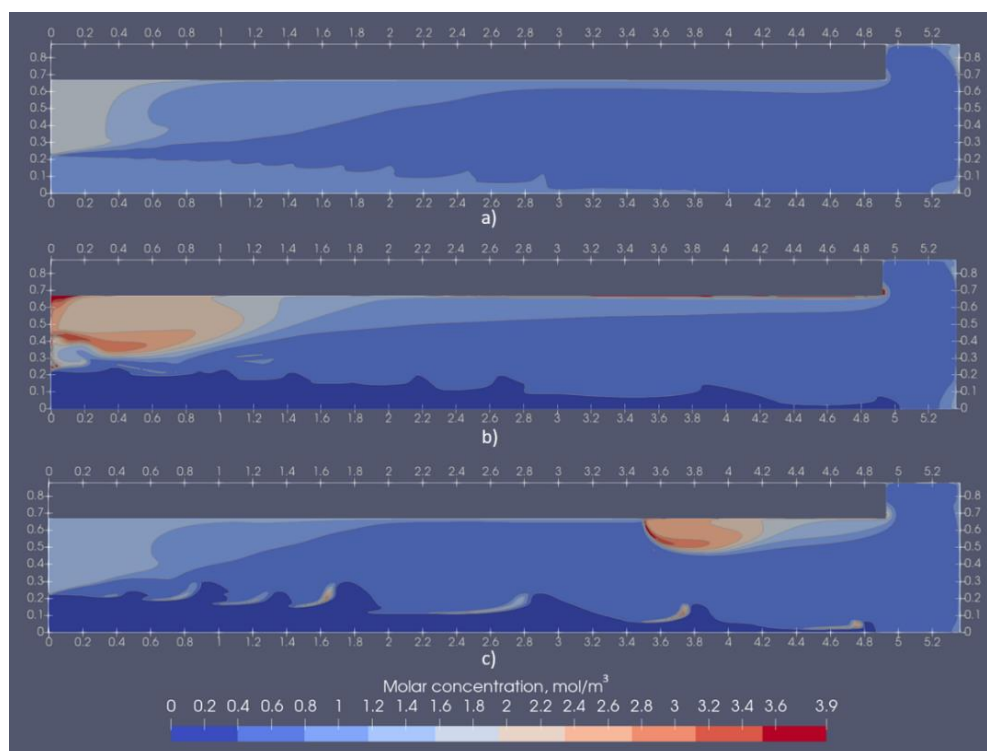


Рис. 6. Контуры молярной концентрации углекислого газа.
Fig. 6. Molar concentration of carbon dioxide.

О более эффективном перемешивании компонентов в случае совместной подачи дымовых газов и топливно-воздушной смеси

также свидетельствует более короткий факел (рис.2а, разница составляет 1 м), по сравнению с другими способами рециркуляции (рис.2б,

с). Также, в ходе моделирования исследовалась стабильность факела в зависимости от скорости подачи топливно-воздушной смеси. Было установлено, что пламя устойчиво в диапазоне скоростей подачи от 1 до 40 м/с.

Данные о средней температуре и усредненном по выходу составе дымовых газов представлены в таблице 1.

Данные таблицы 1 подтверждают гипотезу о локальном замедлении реакций холодными

потоками рециркулирующих газов и утечке непрореагировавших реагентов в них. Снижение средней температуры продуктов сгорания на выходе из топки, несмотря на повышение температуры самого горения является следствием недожога и разбавления горячих продуктов сгорания холодными рециркулирующими потоками.

Таблица 1.

Средняя температура и состав продуктов сгорания на выходе из топки

Table 1.

Average temperature and composition of flue gases at furnace outlet

Способ рециркуляции (Recirculated method)	Средняя температура на выходе, °C (Average outlet temperature, °C)	Молярная концентрация CH ₄ , моль/м ³ (Molar concentration of CH ₄ , mol/m ³)	Молярная концентрация O ₂ , моль/м ³ (Molar concentration of O ₂ , mol/m ³)	Молярная концентрация CO ₂ , моль/м ³ (Molar concentration of CO ₂ , mol/m ³)
Подмешивание в топливно-воздушную смесь (Mixing into the fuel-air mixture)	1730	0.00	0.02	0.71
«Душирующая» рециркуляция ("Suffocating" recirculation)	1650	0.09	0.20	0.75
В хвостовую часть при L _R = 3.5 м (Into the tail section at L _R = 3.5 m)	1520	0.13	0.29	0.81
В хвостовую часть при L _R = 4,0 м (Into the tail section at L _R = 4.0 m)	1510	0.14	0.30	0.81
В хвостовую часть при L _R = 4,5 м (Into the tail section at L _R = 4.5 m)	1500	0.16	0.37	0.88

IV. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ СУХОСТИ РЕЦИРКУЛИРУЮЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ НА АДИАБАТНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ ГОРЕНИЯ И ЭМИССИЮ NO_x

Важным фактором эффективной организации рециркуляции дымовых газов является доля пара в составе рециркулируемых дымовых газов. Чаще применяют так называемую «мокрую» рециркуляцию, которая имеет определенные преимущества перед «сухой» [21,22,23]. В условиях сжигания топлива в воздухе добавление пара снижает температуру горения, что способствует снижению термических NO_x. При кислородном

сжигании топлива пар может ускорять реакции газификации углерода, что улучшает выгорание топлива [24,25,26]. Однако если пара слишком много, он просто разбавляет горючую смесь, замедляя химические реакции и увеличивая риск неполного сгорания (рост эмиссии CO). Это объясняется разной теплоемкостью N₂, CO₂ и H₂O. Помимо разницы в теплоемкости, пары H₂O являются хорошими излучателями в ИК-диапазоне, увеличивая радиационное тепловосприятие и снижая температуру в топке.

Полученные посредством моделирования в Cantera данные (представлены в таблице 2) подтверждают, что наличие H₂O в зоне горения усиливает радиационный

теплообмен, что приводит к снижению пиковых температур в пламени. Поскольку, образование термических NOx крайне чувствительно к температуре, этот эффект подавляет их образование. Здесь r – это доля рециркулируемых газов от общего объема продуктов сгорания, %; x – степень сухости дымовых газов; T – адиабатная температура в топке, К; NOx – концентрация оксидов азота в продуктах сгорания, ppm.

Расчетные концентрации NOx превышают экологические нормативы вследствие допущения об адиабатности горения (максимальный выход термических NOx из-за отсутствия теплотеря) и меньшего объема уходящих газов при кислородном дутье по сравнению с воздушным, что увеличивает объемную концентрацию загрязнителей при неизменном массовом выбросе.

Как следует из Таблицы 2, высокая объемная доля водяного пара в рециркулируемых газах (до 30%) выступает значимым инструментом оптимизации горения. С одной стороны, пар снижает пиковые температуры (подавляя образование термических NOx) и интенсифицирует кинетику окисления за счет генерации радикалов H и OH. С другой стороны, увеличение доли H₂O в кислородной среде способно приводить к дестабилизации фронта пламени и росту химического недожога. Поэтому его использование — это всегда поиск баланса, где выгода от снижения NOx не перекрывается проблемами с устойчивостью горения и ростом выбросов CO.

Таблица 2.

Температура в топке и эмиссия NOx в зависимости от концентрации пара в рециркулируемых дымовых газах (для $\alpha=1,1$)

Tab.2.

Furnace temperature and NOx emissions depending on the steam concentration in the recirculated flue gases (for $\alpha=1.1$)

Способ рециркуляции (Recirculated method)	$r=0\%$	$r=12,5\%$	$r=25\%$	$r=37,5\%$	$r=50\%$
Мокрая рециркуляция $x=0$	$T=2145\text{ K}$ $\text{NOx: } 3026\text{ ppm}$	$T=1983\text{ K}$ $\text{NOx: } 1975\text{ ppm}$	$T=1840\text{ K}$ $\text{NOx: } 1291\text{ ppm}$	$T=1718\text{ K}$ $\text{NOx: } 845\text{ ppm}$	$T=1613\text{ K}$ $\text{NOx: } 562\text{ ppm}$
Влажная рециркуляция $x=0.25$		$T=1991\text{ K}$ $\text{NOx: } 2028\text{ ppm}$	$T=1854\text{ K}$ $\text{NOx: } 1359\text{ ppm}$	$T=1735\text{ K}$ $\text{NOx: } 914\text{ ppm}$	$T=1633\text{ K}$ $\text{NOx: } 619\text{ ppm}$
Влажная рециркуляция $x=0.5$		$T=1999\text{ K}$ $\text{NOx: } 2083\text{ ppm}$	$T=1868\text{ K}$ $\text{NOx: } 1432\text{ ppm}$	$T=1753\text{ K}$ $\text{NOx: } 986\text{ ppm}$	$T=1653\text{ K}$ $\text{NOx: } 682\text{ ppm}$
Влажная рециркуляция $x=0.75$		$T=2007\text{ K}$ $\text{NOx: } 2140\text{ ppm}$	$T=1882\text{ K}$ $\text{NOx: } 1509\text{ ppm}$	$T=1771\text{ K}$ $\text{NOx: } 1064\text{ ppm}$	$T=1674\text{ K}$ $\text{NOx: } 752\text{ ppm}$
Сухая рециркуляция $x=1$		$T=2015\text{ K}$ $\text{NOx: } 2199\text{ ppm}$	$T=1896\text{ K}$ $\text{NOx: } 1591\text{ ppm}$	$T=1790\text{ K}$ $\text{NOx: } 1149\text{ ppm}$	$T=1696\text{ K}$ $\text{NOx: } 831\text{ ppm}$

Посредством обратной двумерной аппроксимации данных таблицы 2 была получена формула для степени сухости рециркулирующих дымовых газов:

$$x(r, \text{NOx}) = \frac{\ln \text{NOx} - a_1 r - \ln \text{NOx}_0}{a_2 + a_3 r},$$

где:

NOx - выбросы оксидов азота с рециркуляцией, ppm;

NOx_0 - выбросы оксидов азота без рециркуляции, ppm;

r - степень рециркуляции, доли единицы;

x - степень сухости рециркулирующих дымовых газов;

a_1, a_2, a_3 - эмпирические аппроксимационные коэффициенты.

Для данных из таблицы 2: $NOx_0 = 3026$ ppm; $a_1 = -3.38$; $a_2 = 0$; $a_3 = 0.84$.

Данная формула может быть применена для автоматического управления степенью сухости пара с целью достижения оптимального режима работы котла и минимизации выбросов NOx .

Выводы

На основе результатов численного моделирования в программном комплексе OpenFOAM были исследованы аэродинамика структуры потока, процессы смесеобразования и горения топлива в топочном пространстве котла в смеси с воздухом, обогащенном кислородом, и сделаны следующие выводы:

1. Для исследуемого типа горелки при доле рециркуляции 21.7 % ввод продуктов сгорания в горелку в смеси с дутьевым воздухом показывает лучшие результаты по снижению эмиссии NOx (за счет снижения температуры горения), по сравнению с методами, где газы рециркуляции подаются «душирующим» образом или в хвостовую часть топки.

2. Скорость подачи топлива и окислителя в смеси с рециркулируемыми дымовыми газами в камеру сгорания должна быть не более 20–25 м/с (с учетом запаса устойчивости горения) и не менее 1 м/с для предотвращения отрыва и проскока пламени.

3. Область стабилизации факела должна быть изолирована от вторичных токов охлаждающего CO_2 . В местах столкновения фронта пламени с потоками рециркулирующих дымовых газов, может наблюдаться образование сажи из-за резкого охлаждения зоны реакций и недожога.

4. Управление концентрацией влаги в рециркулируемых дымовых газах является эффективным и технологически гибким инструментом оптимизации процесса сжигания природного газа в энергетических котлах, работающих по технологии кислородного сжигания.

5. Оптимальное соотношение между степенью рециркуляции r и степенью сухости газов x определяется на основе баланса между

требуемым уровнем снижения NOx , эксплуатационной надежностью котла и экономической целесообразностью. Предложенная аппроксимационная модель позволяет на этапе проектирования и режимной наладки оценить необходимую глубину осушения рециркулирующих газов, адаптируя технологию к конкретным условиям работы энергетического котла и требованиям природоохранного законодательства.

Таким образом, снижение вредных выбросов токсичных веществ и парниковых газов в уходящих газах в жаротрубных котлах можно осуществить с помощью мер, сводящихся к организации технологических процессов сжигания в воздухе, обогащенном кислородом. Применение рециркуляции дымовых газов не только позволяет снизить объем удаляемых продуктов горения на единицу вырабатываемой тепловой энергии [27], но и выбросы NOx за счет понижения температуры горения, по сравнению с чистым воздухом. При этом конструкция горелочного устройства и режимы его работы во многом определяют интенсивность воспламенения факела, условия и скорость смешения топлива с окислителем и максимальный уровень температуры в ядре горения. Изменяя концентрацию влаги в рециркулируемых дымовых газах, также можно влиять на эти параметры и, тем самым, повышать эффективность сжигания топлива.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № Н-25.1/38.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Hu F., Sun H., Zhang T., Wang Q., Li Y., Liao H., Wu X., Liu Z. Comparative study on process simulation and performance analysis in two pressurized oxy-fuel combustion power plants for carbon capture, *Energy Conversion and Management*, 2024. Vol. 303, P.118178. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118178>.
- [2] Buhre BJP, Elliott LK, Sheng RP, Gupta RP, Wall TF. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. *Progress in Energy and Combustion Science* 2005; 31:283–307.
- [3] Scheffknecht G., Al-Makhadmeh L., Schnell U., Maier J. Oxy-fuel coal combustion—A review of the current state-of-the-art. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, no. 5, pp. 16–

35. doi:
<https://DOI.ORG/10.1016/j.ijggc.2011.05.020>.
- [4] Zhang F, Li X, Xie S, Wang J and Wang X Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of a Laminar NonPremixed Methane Jet Flame in Oxygen/Carbon Dioxide Coflow. *Frontiers in Energy Research*, 2022, vol.10. doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.847947>
- [5] The chemical mechanism of steam's effect on the temperature in methane oxy-steam combustion / Z. Chun, S. Yu, L. Guoyuan, C. Shiyang, H. Yizhuo, Z. Chuguang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – V. 75. – p. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2014.03.051>
- [6] Rogalev A., Rogalev N., Kindra V., Komarov I., Zlyvko O. Research and development of the oxy-fuel combustion power cycles with CO2 recirculation. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 9, pp. 2927. doi: <https://doi.org/10.3390/en14102927>
- [7] Zheng Miao, Mengmeng Tian, Yuchen ZhagJinliang Xu. Thermodynamic analysis and optimization of the semi-closed oxy-combustion supercritical CO₂ power cycle with blending hydrogen into the natural gas/syngas. *Energy Conversion and Management*, 2024, Vol. 319. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118946>
- [8] Xin Y., Wang K., Zhang Y., Zeng F., He X., Takyi Sh.A., Tontiwachwuthikul P. Numerical Simulation of Combustion of Natural Gas Mixed with Hydrogen in Gas Boilers. *Energies*, 2021, vol. 14. <https://doi.org/10.3390/en14216883>
- [9] Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of a Laminar NonPremixed Methane Jet Flame in Oxygen/Carbon Dioxide Coflow / F. Zhang, X. Li, S. Xie et al. // *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. P. 847947. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.847947>
- [10] Zhang F, Li X, Xie S, Wang J and Wang X Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of a Laminar NonPremixed Methane Jet Flame in Oxygen/Carbon Dioxide Coflow. *Frontiers in Energy Research*, 2022, vol.10. doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.847947>
- [11] Normann F., Andersson K., Leckner B., Johnsson F. Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, vol. 35, no. 5, pp. 385-397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.04.002>
- [12] Amiri M., Barański J., Stasiak K., Ziółkowski P., Ditaranto M., Wiseman S., Mikieliewicz D. Innovative oxy-fuel burner design with direct water injection for enhanced combustion control, *Applied Thermal Engineering*, 2025. Vol. 281, Part 3, P. 128700, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128700>.
- [13] Zeldovich Y.B. The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. *Acta Physicochimica USSR* 1946; 21:577–628.
- [14] Preobrazhenskij N.I. Kontrol' za racional'nym ispol'zovaniem gaza. – L.: Nedra, 1983. – 368 p. (In Russian).
- [15] Zhang C, Atreya A, Lee K. Sooting structure of methane counterflow diffusion flames with preheated reactants and dilution by products of combustion. 24th Symposium on Combustion 1992:1049–51.
- [16] Liu F, Guo H, Smallwood JS. The chemical effect of CO₂ replacement of N₂ in air on the burning velocity of CH₄ and H₂ premixed flames. *Combustion and Flame* 2003; 133:495–7.
- [17] Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of a Laminar NonPremixed Methane Jet Flame in Oxygen/Carbon Dioxide Coflow / F. Zhang, X. Li, S. Xie et al. // *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. P. 847947. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.847947> EDN: OIDZRT
- [18] Issledovanie vliyaniya SO₂ razbavitelya na gorenie topliva v metan-kislorodnyh kamerah sgoraniya / I. I. Komarov, D. M. Harlamova, A. N. Vegera, V. Yu. Naumov // *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. – 2021. – № 2. – p. 14-22. – DOI <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2021.2.014-022>. – EDN CPOUIU. (In Russian).
- [19] Glarborg P, Bentzen LLB. Chemical effects of high CO₂ concentration in oxyfuel combustion of methane. *Energy & Fuels* 2008;22:291–6.
- [20] Toporov D, Bocian P, Kellermann A, Stadler H, Tschunko S, Forster M, et al. Detailed investigation of pulverized fuel swirl flame in CO₂/O₂ atmosphere. *Combustion and Flame* 2008;155:605–8.
- [21] C. Ndibe, R. Spörl, J. Maier, and G. Scheffknecht, “Experimental study of NO and NO₂ formation in a PF oxy-fuel firing system,” *Fuel*, vol. 107, May 2013, pp. 749–756, 2013, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.055>
- [22] Yu, B., Lee, S., Lee, C.E. Study of NO_x emission characteristics in CH₄/air non-premixed flames with exhaust gas recirculation. *Energy*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.023>
- [23] Zajacs, A., Zeiza-Selezņova, A., Rusovs, D. Impact of Flue Gas Recirculation on the Efficiency of Hot-water Boilers; 2020; Construction of Unique Buildings and Structures; 93; Article No 9304. doi: 10.18720/CUBS.93.4
- [24] Pan, F., Zhu, J., Liu, J. et al. Effect of H₂O on Preheating Combustion Characteristics in O₂/CO₂ and O₂/N₂ Atmospheres. *J. Therm. Sci.* 32, 2235–2242 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1851-6>

- [25] Quantitative analysis of the impact of flue gas recirculation on the efficiency of oxy-coal power plants. A Gopan, P Verma, Z Yang, RL Axelbaum. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 95, 102936, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102936>
- [26] Kim, H. W., Seo, S. B., Kang, S. Y., Go, E. S., Oh, S. S., Lee, Y., Yang, W., & Lee, S. H. (2021). Effect of flue gas recirculation on efficiency of an indirect supercritical CO₂ oxy-fuel circulating fluidized bed power plant. *Energy*, 227, 120487. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120487>
- [27] Morón, W., Ferens, W. & Wach, J. Emission of typical pollutants (NO_x, SO₂) in the oxygen combustion process with air in-leakages. *Environ Sci Pollut Res* 28, 50683–50695 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14292-9>

Сведения об авторах.



Кочарян Евгений Валерьевич, канд. техн. наук, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – декарбонизация традиционной энергетики. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5141-2455> E-mail: kocha99@mail.ru



Бедило Андрей Валерьевич, инженер, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – теплофизика, математическое моделирование. <https://orcid.org/0009-0005-2404-2269> E-mail: umr-repetitor@mail.ru



Шелест Никита Андреевич, аспирант, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – оптимизация режимов работы теплоэнергетического оборудования. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3413-4013> E-mail: shelest.nikita2018@yandex.ru



Арушанян Рубен Рафаэлович, старший преподаватель, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – математическое моделирование процессов теплофизики. <https://orcid.org/0000-0002-2556-2726> E-mail: rubenarushanyan@gmail.com