

Study of Steam Turbine Unit Operation Using Natural Gas Combustion in Pure Oxygen to Ensure Decarbonisation through Gas Path Modernization (using the Example of a TGM-94 (EP-500/140) steam boiler)

¹Shaposhnikov V.V., ²Butuzov V.A., ¹Kocharyan E.V., ¹Batko D.N.,
¹Shelest N.A.

¹Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin,
Krasnodar, Russian Federation

Abstract. The research is aimed at substantiating the technical use of natural gas combustion in an environment with a high oxygen content and, in the long-run objective - in pure oxygen in a steam turbine power unit. To achieve this aim, the following problems were solved: the development of a mathematical model of a steam turbine power unit for operation when burning natural gas in pure oxygen, a numerical study of the power unit operation when replacing air with oxygen from 0 to 100%, and an assessment of the efficiency of the equipment in these modes. The most important result is an increase in the efficiency of the steam turbine power unit when switching to burning natural gas in an environment with a high oxygen content. The significance of the results obtained is to ensure the efficiency of CO₂ capture from flue gases without a complete reconstruction of the facility. The object of the study was the Krasnodar Thermal Power Plant. In the study, the previously verified mathematical model of the power unit was modified. The model was created using the Boiler Designer software product. The mathematical model was modified by zeroing air leaks into the boiler gas path, replacing the regenerative air heater with a tubular one, and bypassing the air heater along the flue gases when operating on an oxygen-air mixture. The maximum increase in the boiler unit efficiency is 0.6% and is in the range of air substitution with oxygen from 40 to 60%.

Keywords: boiler unit, thermal power plant, steam turbine unit, oxygen combustion, carbon dioxide.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.4-64.08>

UDC: 621.165

O investigație a unei unități de alimentare cu turbină cu abur la arderea gazului natural în oxigen pur pentru a asigura decarbonizarea datorită modernizării căii de gaz (folosind exemplul unui cazan cu abur TGM-94 (EP-500/140))

¹Șapoșnikov V.V., ²Butuzov V.A., ¹Kociaryan E.V., ¹Batiko D.N., ¹Șelest N.A.

¹Universitatea Tehnologică de Stat din Kubani, Krasnodar, Federația Rusă

²Universitatea Agrară de Stat din Kubani numită după I.T.Trubilin, Krasnodar, Federația Rusă

Rezumat. Cercetarea are ca scop fundamentarea utilizării tehnice a arderii gazelor naturale într-un mediu cu conținut ridicat de oxigen; și în obiectiv pe termen lung - în oxigen pur într-o unitate de putere cu turbină cu abur. Pentru a atinge acest scop, au fost rezolvate următoarele probleme: dezvoltarea unui model matematic al unei unități de putere cu turbină cu abur pentru funcționarea la arderea gazelor naturale în oxigen pur, un studiu numeric al funcționării unității de putere la înlocuirea aerului cu oxigen de la 0 la 100% , și o evaluare a eficienței echipamentului în aceste moduri. Cel mai important rezultat este o creștere a eficienței unității de putere a turbinei cu abur la trecerea la arderea gazelor naturale într-un mediu cu conținut ridicat de oxigen. Semnificația rezultatelor obținute este asigurarea eficienței captării CO₂ din gazele de ardere fără o reconstrucție completă a instalației. Obiectul studiului a fost Centrala Termoelectrică Krasnodar. În studiu, modelul matematic verificat anterior al unității de putere a fost modificat. Modelul a fost creat folosind produsul software Boiler Designer. Modelul matematic a fost modificat prin reducerea la zero a scurgerilor de aer în calea gazului cazanului, înlocuirea încălzitorului de aer regenerativ cu unul tubular și ocolirea încălzitorului de aer de-a lungul gazelor de ardere atunci când funcționează cu un amestec de oxigen-aer. Creșterea maximă a randamentului unității cazanului este de 0,6% și se află în intervalul de înlocuire a aerului cu oxigen de la 40 la 60%.

Cuvinte-cheie: agregat de cazan, CET, turbina cu abur, arderea oxigenului, dioxid de carbon.

Исследование работы паротурбинного энергоблока при сжигании природного газа в чистом кислороде с целью обеспечения декарбонизации за счет модернизации газового тракта (на примере парового котла ТГМ-94 (ЕП-500/140))

¹Шапошников В.В., ²Бутузов В.А., ¹Кочарян Е.В., ¹Батько Д.Н., ¹Шелест Н.А.

¹Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Российская Федерация

²Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является обоснование возможности технической реализации сжигания природного газа в среде с повышенным содержанием кислорода, а в пределе – в чистом кислороде на паротурбинном энергоблоке. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: разработка математической модели паротурбинного энергоблока для работы при сжигании природного газа в чистом кислороде, численное исследование работы энергоблока при замещении воздуха кислородом от 0 до 100%, оценка эффективности работы оборудования в этих режимах. Наиболее важным результатом является подтверждение повышения эффективности работы паротурбинного энергоблока при переходе на сжигание природного газа в среде с повышенным содержанием кислорода. Значимость полученных результатов состоит в обеспечении эффективности улавливания CO₂ из дымовых газов без полной реконструкции объекта. Объектом исследования выбрана Краснодарская ТЭЦ. В этом исследовании была доработана ранее верифицированная математическая модель энергоблока. Создание модели проводилось с использованием программного продукта Boiler Designer. Математическая модель была доработана путем обнуления присосов воздуха в газовый тракт котла, заменой регенеративного воздухоподогревателя на трубчатый и обвода воздухоподогревателя по дымовым газам при работе на смеси кислорода с воздухом. Максимальный прирост КПД котлоагрегата составляет 0.6% и находится он в диапазоне доли замещения воздуха кислородом от 40 до 60%. Снижение составляет 3.4 г уг. / кВт*ч по сравнению с работой энергоблока на чистом воздухе. Сам по себе переход на кислородное сжигание природного газа не приводит к снижению массового расхода выбрасываемого CO₂. Однако, из-за существенного снижения количества азота в составе дымовых газов концентрация углекислого газа в них возрастает с 9.1 до 33.1% объемных и с 14.6 до 54.3% массовых.

Ключевые слова: котлоагрегат, ТЭС, паротурбинная установка, кислородное сжигание, углекислый газ.

ВВЕДЕНИЕ

В целях реализации международных климатических соглашений на наднациональном и национальном уровнях используются различные меры политики, стимулирующие в числе прочего технологический переход мировой энергетики от генерации на основе углеводородного сырья и других видов топлива к безуглеродным энергоресурсам и энергоресурсам с низким уровнем выбросов парниковых газов (далее – глобальный энергопереход).

Глобальный энергопереход формирует новые тренды для устойчивого развития мировой энергетики и экономики и определяет новые вызовы для стран – экспортеров углеводородного сырья, связанные со снижением спроса на это сырье.

В то же время активизация климатической повестки создает предпосылки для появления в мировой экономике новых рынков.

По оценке Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде, с 2008 по 2018 год масса антропогенных выбросов парниковых газов в мире ежегодно увеличивалась на 1.5% и в 2018 году достигла 55 млрд. тонн эквивалента углекислого газа.

При этом около 80% эмиссии приходится на долю стран «Группы двадцати». По сравнению с 1990 годом масса глобальных выбросов парниковых газов увеличилась на 40-50%.

На глобальном уровне энергетический сектор генерирует на сегодняшний день порядка 75% мировых выбросов парниковых газов. Его трансформация является ключом к предотвращению негативных последствий изменения климата. Достижение углеродной нейтральности и сокращение глобальных выбросов углекислого газа (CO₂) до нуля нетто к 2050 г. является международно признанным решением, которое позволит ограничить повышение средней глобальной температуры планеты в пределах 1.5 °С и тем самым предотвратить необратимые изменения климата. В этом контексте достижение поставленных глобальных целей требует полной трансформации технологий производства, накопления, транспортировки и потребления энергии.

Наблюдается тренд к увеличению доли природного газа в качестве топлива при генерации электрической энергии. Ожидается, что парогазовые установки с номинальным КПД (при базовой нагрузке ISO) выше 60%

сыграют значительную роль в сокращении выбросов углекислого газа при производстве электроэнергии [1].

Одним из перспективных решений в этой сфере является применение генерирующих мощностей на основе кислородно-топливного энергетического цикла Аллама, в котором используется углекислый газ в сверхкритическом состоянии [2, 3]. Ожидаемое значение электрического КПД такого цикла составляет порядка 59%, при этом сжатый CO_2 является еще и дополнительным полезным продуктом при генерации электрической энергии. Предложенный Р. Алламом подход привлек внимание многим исследователям по всему миру. Параметры рабочего тела 650 °C и 30 МПа предъявляют особые требования к материалам и ведутся исследования по созданию сплавов, способных обеспечить работу турбин в течение всего жизненного цикла турбины [4, 5]. Разрабатываются специальные конструкции газовых турбин и компрессоров CO_2 [6, 7]. Многие ученые совершенствуют термодинамику цикла [8, 9, 10, 11, 12], а другие рассматривают возможность создания комбинированных парогазовых установок, использующих в качестве газотурбинной части – цикл Аллама [13, 14, 15].

В рамках тематики нашего исследования важно отметить разработки в области улавливания и захоронения CO_2 [16]. Существующие методы улавливания углекислого газа объединяет повышение эффективности при повышении его концентрации в смеси [17, 18].

В случае массового распространения цикла Аллама решится вопрос только с вновь вводимыми объектами. При этом действующие паротурбинные электростанции продолжают производить электроэнергию со значительными выбросами углекислого газа. Одно из возможных решений – переход на сжигание в среде чистого кислорода (кислородное сжигание).

Кислородное сжигание активно развивается на основе многочисленных фундаментальных и практических исследований. Поскольку для поддержания надлежащих режимных параметров необходим балластный компонент, то

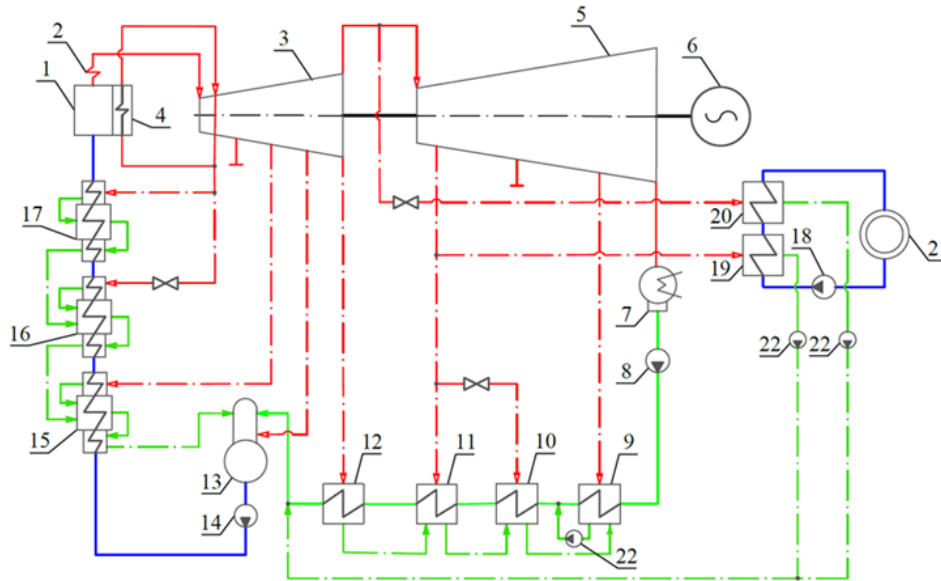
используют частичную рециркуляцию дымовых газов. Она имеет ряд преимуществ по сравнению с другими технологиями [19, 20]. Кислородное сжигание топлив позволяет получить дымовые газы с повышенным содержанием CO_2 . При реализации метода необходимо обеспечить рециркуляцию части дымовых газов, вводя их в зону горения так, чтобы создать необходимые температурные условия. Конкретный способ реализации технологии сжигания топлива в смеси O_2/CO_2 зависит от того, в какой схеме сжигания намечено использовать эту технологию. Сжигание в обычном котле требует незначительных модификаций поверхностей нагрева в связи с изменением состава и скоростей газов по тракту котла, а также изменения конструкции горелок и установки мощных дымососов рециркуляции [21].

Кислородное сжигание также приобретает все большее значение в сокращении выбросов NO_x и SO_2 [22, 23]. Выбросы NO_x при этом составляют менее одной трети от сгорания в воздухе. Кислородное сжигание имеет следующие дополнительные преимущества: топливная гибкость, работоспособность при высокой концентрации кислорода, сокращение площади, занимаемой установкой до 50%, значительное снижение количества рециркуляции дымовых газов и улавливания SO_2 [24]. Однако процесс отделения кислорода от воздуха для получения чистого потока кислорода является энергоемким и требует более высоких эксплуатационных затрат.

Цель данного исследования заключается в обосновании технической реализации, моделировании и анализе эффективности сжигания природного газа в среде с повышенным содержанием кислорода, а в пределе – в чистом кислороде, в паротурбинной установке для снижения выбросов CO_2 .

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве объекта исследования выбрана Краснодарская ТЭЦ. На сегодняшний день ее оборудование представлено четырьмя паротурбинными блоками К-150-130 производства ХТГЗ, три из которых были реконструированы в Т-145/160-130 путем организации в них регулируемых отборов на теплофикацию, и парогазовой установкой ПГУ-410.



1 – паровой котел, 2 – пароперегреватель, 3 – цилиндр высокого давления, 4 – промежуточный пароперегреватель, 5 – цилиндр низкого давления, 6 – электрогенератор, 7 – конденсатор, 8 – конденсатный насос, 9 – подогреватель низкого давления №1 (ПНД-1), 10 – ПНД-2, 11 – ПНД-3, 12 – ПНД-4, 13 – деаэратор, 14 – питательный насос, 15 – подогреватель высокого давления №6 (ПВД-6), 16 – ПВД-7, 17 – ПВД-8, 18 – сетевой насос, 19 – основной подогреватель сетевой воды, 20 – пиковые подогреватели сетевой воды, 21 – потребитель тепла, 22 – дренажные насосы.

Рис. 1. Принципиальная тепловая схема энергоблока Т-145/160-130 Краснодарской ТЭЦ.

1 – steam boiler, 2 – superheater, 3 – high-pressure cylinder, 4 – intermediate superheater, 5 – low-pressure cylinder, 6 – electric generator, 7 – condenser, 8 – condensate pump, 9 – low-pressure heater No. 1 (LPH-1), 10 – LPH-2, 11 – LPH-3, 12 – LPH-4, 13 – deaerator, 14 – feed pump, 15 – high-pressure heater No. 6 (HPH-6), 16 – LPH-7, 17 – LPH-8, 18 – network pump, 19 – main network water heater, 20 – peak network water heaters, 21 – heat consumer, 22 – drainage pumps.

Fig. 1. Schematic thermal diagram of the power unit T-145/160-130 of the Krasnodar TPP.

Последняя является трехконтурной бинарной парогазовой установкой, построенной на базе газотурбинной установки типа M701F4 производства Mitsubishi Heavy Industries, Ltd (Япония).

Объект моделирования – энергоблок №4, на котором применен паровой котел ТГМ-94 (ЕП-500/140). Принципиальная тепловая схема энергоблока приведена на рисунке 1. Принцип ее работы детально описан авторами в предыдущих статьях.

II. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Математическая модель была разработана в программе Boiler Designer.

К ее плюсам можно отнести проведение детального как теплового, так и гидравлического расчета всех элементов [25]. При этом для рас-

чета коэффициентов теплоотдачи в гладкотрубных и оребренных пучках, кожухотрубных теплообменниках с перегородками и других применяются хорошо апробированные нормативные методики. Также важно, что существует возможность создания управляемых и всережимных моделей. Программа успешно внедрена более чем в 80 фирмах России, Германии, Бельгии, Австрии и Китая, в том числе Подольский котлостроительный завод (ЗиО), Таганрогский котельный завод (ТКЗ), Теплоэлектропроект, ВТИ, МЭИ, ИЭИ, Deutsche Babcock, EVT, Standardkessel, NEPRI и др. С её помощью рассчитано более 1000 котлов различных типов (прямоточных, барабанных, утилизационных, с циркулирующим кипящим слоем, с дымогарными трубками и др.) и тепловых схем. Опыт эксплуатации подтвердил её высокую эффективность и точность.

На первом этапе разработки математической модели была составлена схема парового котла и задание параметров ее элементов в соответствии с данными завода-изготовителя. Задавались: последовательность теплообменных поверхностей по газовому и пароводяному трактам, их геометрические размеры, материал, коэффициенты тепловой эффективности и др. Результаты моделирования показали достаточную сходимость с заводским расчетом.

Верификация математической модели проводилась по данным для котла энергоблока №4, предоставленным Краснодарской ТЭЦ: режимная карта котла и результаты замеров содержания кислорода в разных точках газового тракта, температуры дымовых газов, воды и пара за разными поверхностями нагрева.

Замеры были предоставлены для четырех режимов с различной паропроизводительностью (250, 340, 400, 440 т/ч) при работе на природном газе. С помощью этих данных была произведена настройка математической модели, в ходе которой были уточнены коэффициенты эффективности конвективных поверхностей нагрева, присосы по газовому тракту котла, параметр топки M , характеризующий положение факела в топке и ряд других. Верификация показала достаточную точность модели.

Разработка математической модели энергоблока велась в строгом соответствии с фактической схемой. Давление в отборах было принято из инструкции по обслуживанию турбинного оборудования блочной части.

Верификация математической модели энергоблока проводилась при работе на природном газе с отключенной теплофикационной установкой и закрытым отбором пара в общестанционный коллектор. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных показали достаточную сходимость.

Для исследования работы паросилового блока в режиме кислородного сжигания в программе Boiler Designer была доработана ранее полученные и верифицированные математические модели парового котла и энергоблока.

Моделирование кислородного сжигания природного газа в паровом котле паротурбинной установки потребовало внесение изменений в математическую модель. При моделировании парового котла ТГМ-94 энергоблока Т-

145/160-130 Краснодарской ТЭЦ были выбраны присосы воздуха по каждому его элементу таким образом, чтобы состав дымовых газов в модели соответствовал замерам. При запросе на извлечение и утилизацию углекислого газа возникает потребность в повышении его концентрации в дымовых газах. Это возможно осуществить только при газоплотном исполнении котлов. Поэтому в математической модели присосы воздуха по элементам были приравнены к 0.

В котле ТГМ-94 используются регенеративные воздухоподогреватели, представляющие собой вращающиеся барабаны с набивкой, которая попеременно взаимодействует с воздухом на входе в котел и уходящими газами. Газоплотное исполнение таких элементов конструкции невозможно. Поэтому в математической модели воздухоподогреватели были заменены на трубчатые. Их площади подобраны из условия равенства тепловой мощности воздухоподогревателей. Схема газового тракта после реконструкции приведена на рисунке 2.

Такие же изменения потребуются провести и с оборудованием паротурбинной установки для вывода ее на целевые характеристики по составу уходящих газов, который определяет количество выбросов парниковых газов.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование кислородного сжигания природного газа производилось при замещении воздуха чистым кислородом в диапазоне от 0 до 100% потребности в нем. Исследование производилось при фиксированном объемном расходе природного газа на номинальном уровне – $45317 \text{ м}^3/\text{ч}$.

При замещении воздуха чистым кислородом возникает ряд негативных последствий. Во-первых, снижается объем продуктов сгорания в газовом тракте котла. Это приводит к снижению коэффициента теплопередачи в конвективных поверхностях нагрева: части пароперегревателей, экономайзера и воздухоподогревателя. Для устранения этого негативного эффекта использовалась штатная система рециркуляции дымовых газов. Часть дымовых газов отбиралась перед воздухоподогревателем и направлялась дымососами рециркуляции в топку. Процент рециркуляции определялся из условия компенсации объема продуктов сгорания. В обычных условиях система рециркуляции дымовых газов применяется для уменьшения образования оксидов азота (NO_x)

при работе на природном газе и для повышения коэффициента теплоотдачи конвективных поверхностей нагрева при работе на мазуте.

Во-вторых, снижается расход воздуха через воздухоподогреватель, т.к. чистый кислород подается непосредственно в горелочное устройство.

Это приводит к изменению температурного режима трубок воздухоподогревателя и возникновению риска их пережога. Чтобы этого не допустить, при работе на чистом кислороде и смеси кислорода с воздухом было принято решение отключать воздухоподогреватель путем обвода его по дымовым газам.

На рисунках 3 – 10 приведены зависимости параметров при сжигании природного газа в кислороде на энергоблоке Т-145/160-130. Результаты расчетов с использованием модифицированной модели с учетом фактически нового окислителя, состоящего из газов рециркуляции и кислорода, подаваемого в

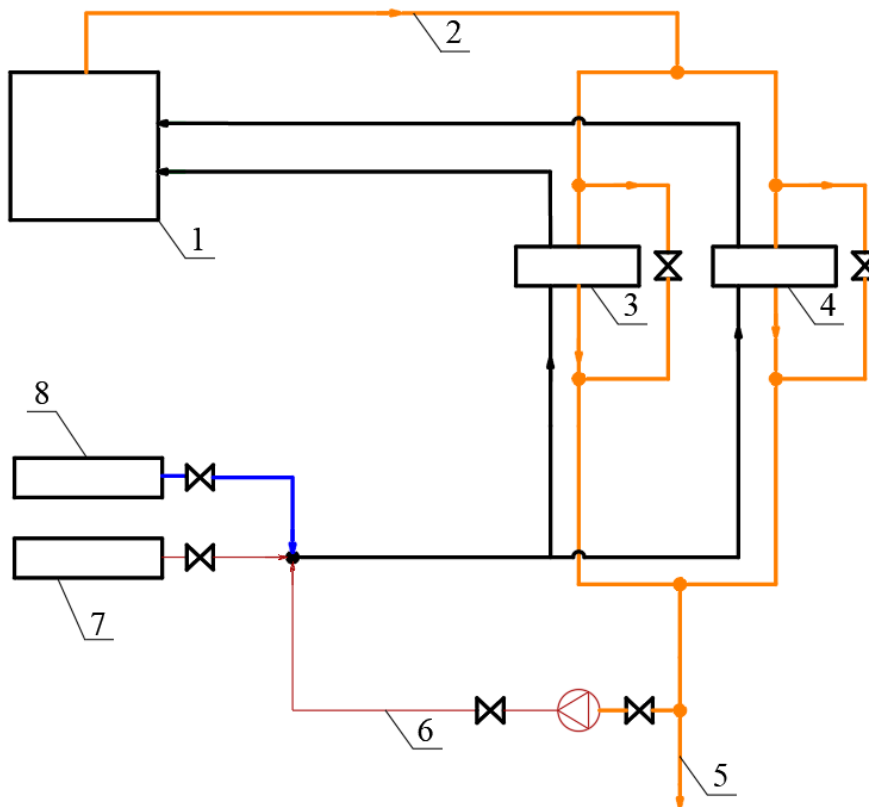
котел, качественно совпадают с данными исследований других авторов.

Снижение адиабатной температуры в топке при увеличении доли кислорода и, соответственно, объема рециркулируемых дымовых газов получены в результате моделирования аналогичных процессов в работах авторов [26, 27]. Данный эффект можно объяснить увеличением доли CO_2 , который подавляет повышение температуры.

Увеличение КПД котла и соответствующее ему снижение удельного расхода топлива на выработку энергии, также наблюдалось в ходе численного моделирования в работе [26].

Это объясняется тем, что расход уходящих газов значительно снижается из-за почти полного исключения азота из их состава.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты можно считать адекватными, в достаточной мере отражающими процессы, происходящие в котле энергоблока.



1 – паровой котел, 2 – дымовые газы, 3 – трубчатый воздухоподогреватель №1 (ТВП-1), 4 – трубчатый воздухоподогреватель №2 (ТВП-2), 5 – уходящие газы, 6 – газы рециркуляции, 7 – вход кислорода, 8 – вход воздуха

Рис. 2. Схема реконструкции.

1 – steam boiler, 2 – flue gases, 3 – tubular air heater №1 (TAH-1), 4 – tubular air heater №2 (TAH-2), 5 – exhaust gases, 6 – recirculation gases, 7 – oxygen inlet, 8 – air inlet

Fig. 2. Reconstruction scheme.

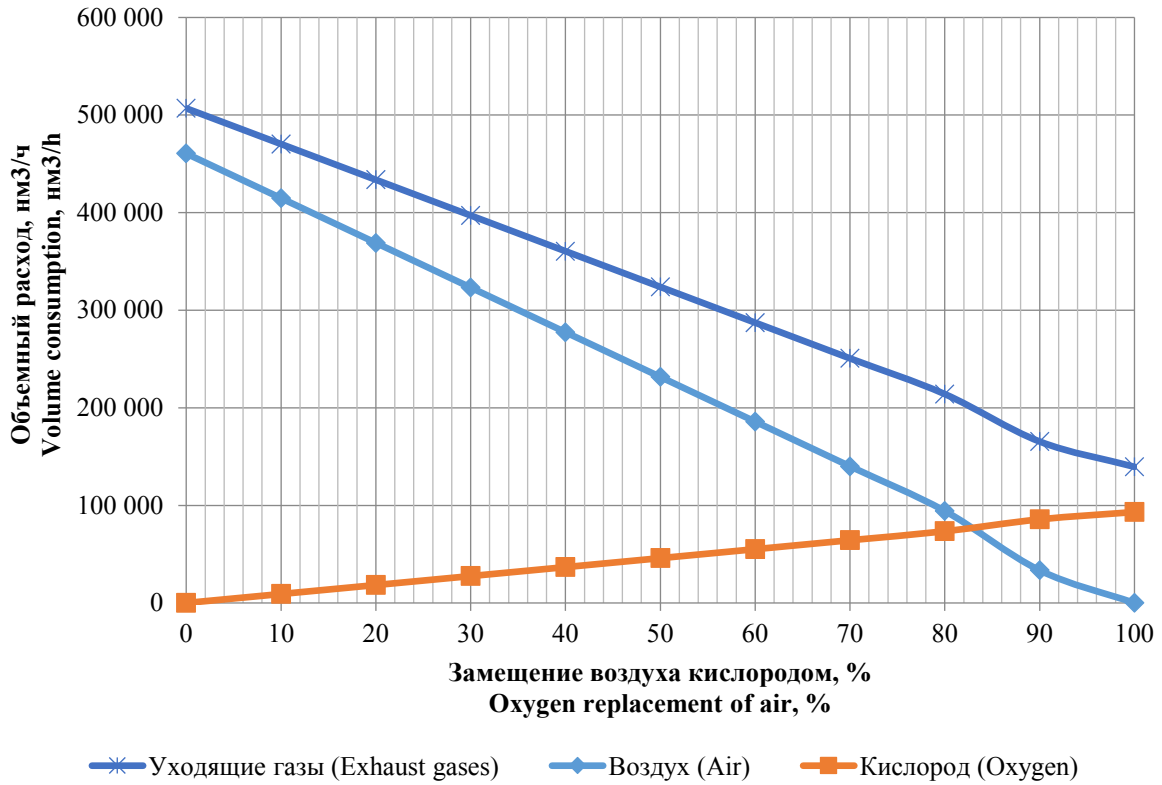


Рис. 3. Зависимость объемных расходов уходящих газов, воздуха и кислорода от доли замещения воздуха кислородом.

Fig. 3. Dependence of volumetric flow rates of flue gases, air and oxygen on the replacement proportion of air with oxygen.

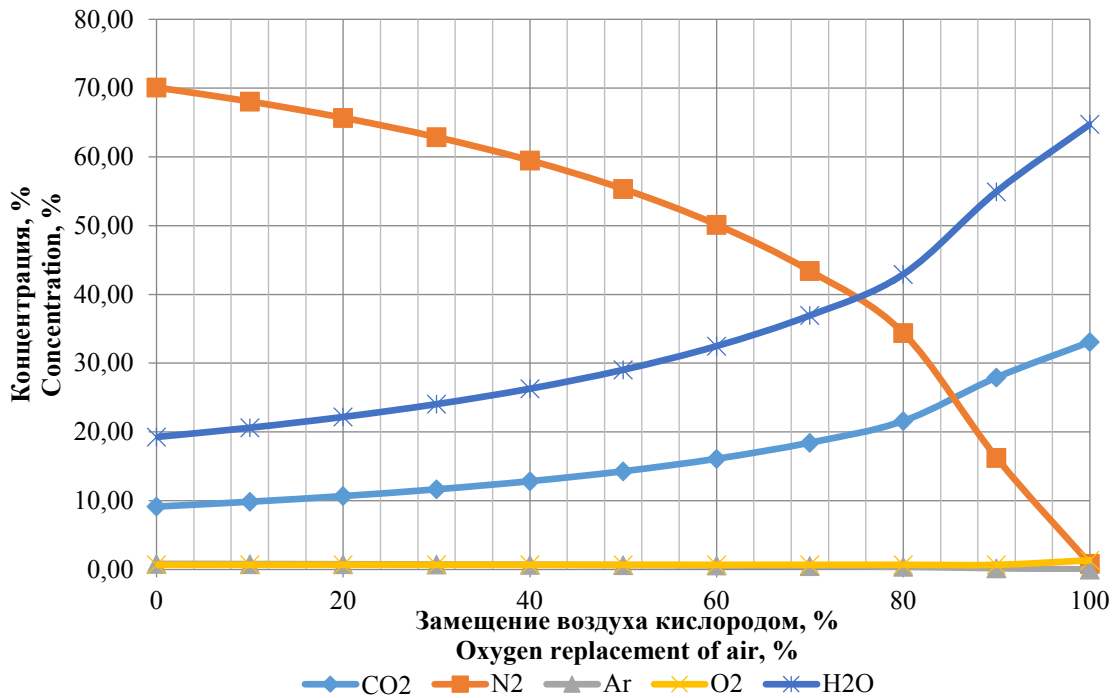


Рис. 4. Зависимость объемных концентраций компонентов дымовых газов от доли замещения воздуха кислородом.

Fig. 4. Dependence of volumetric concentrations of flue gas components on the air replacement proportion with oxygen.

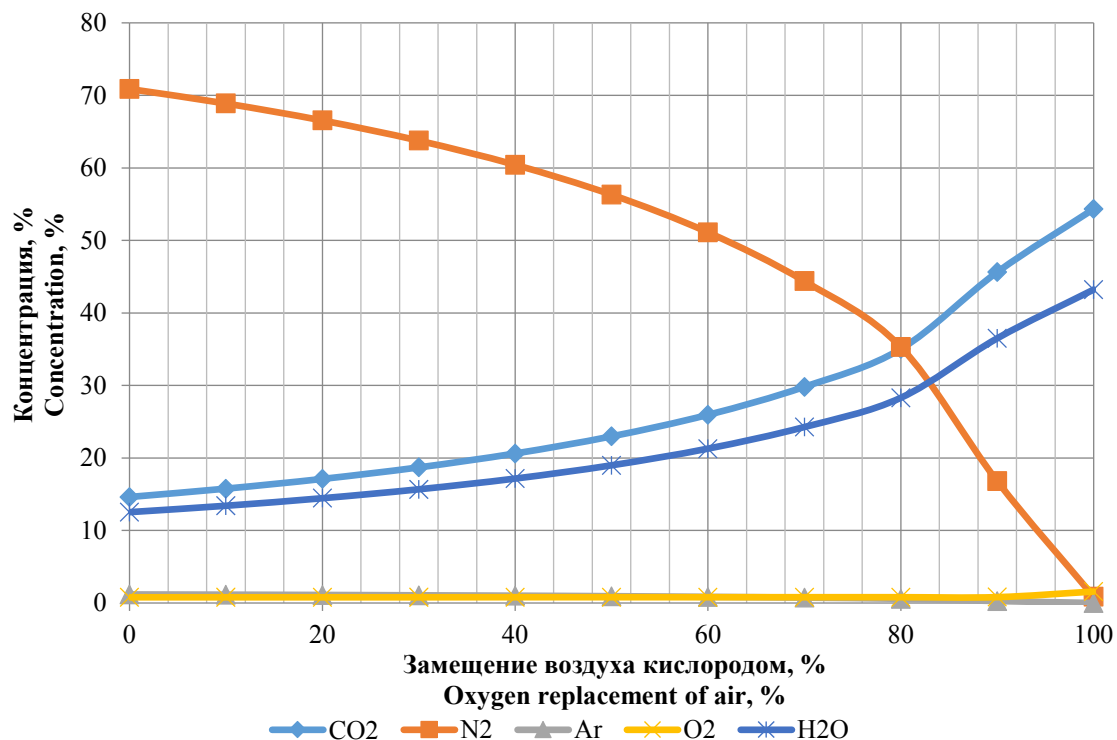


Рис. 5. Зависимость массовых концентраций компонентов дымовых газов от доли замещения воздуха кислородом.

Fig. 5. Dependence of mass concentrations of flue gas components on the replacement proportion of air with oxygen.

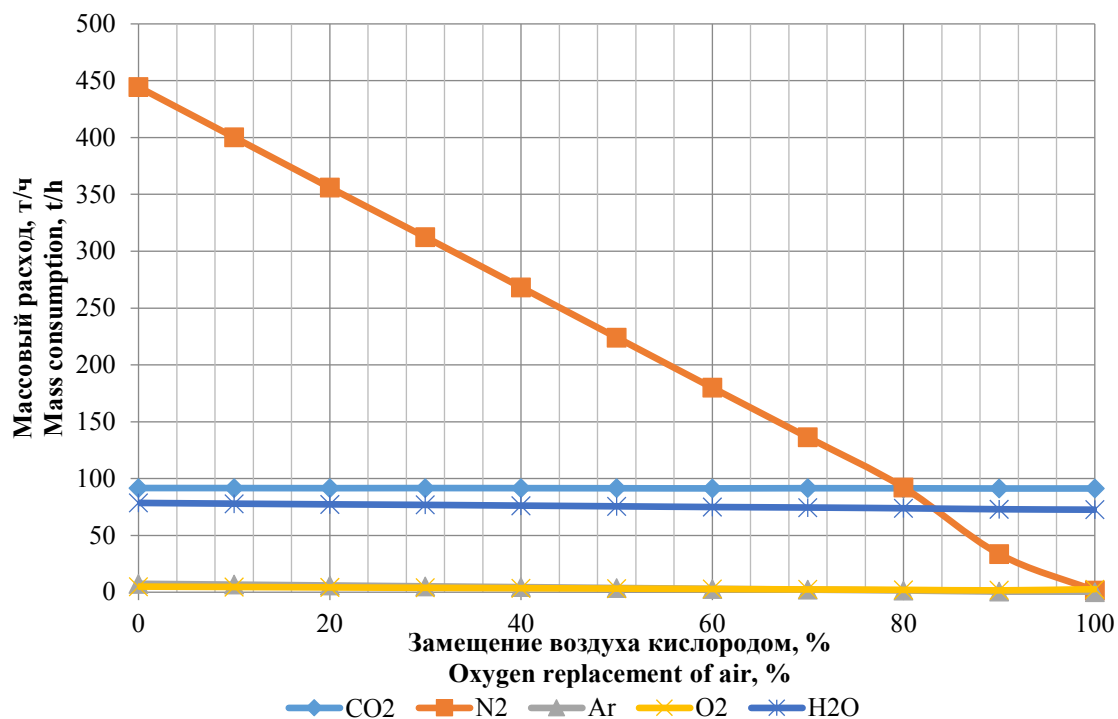


Рис. 6. Зависимость массовых расходов компонентов дымовых газов от доли замещения воздуха кислородом.

Fig. 6. Dependence of mass flow rates of flue gas components on the replacement proportion of air with oxygen.

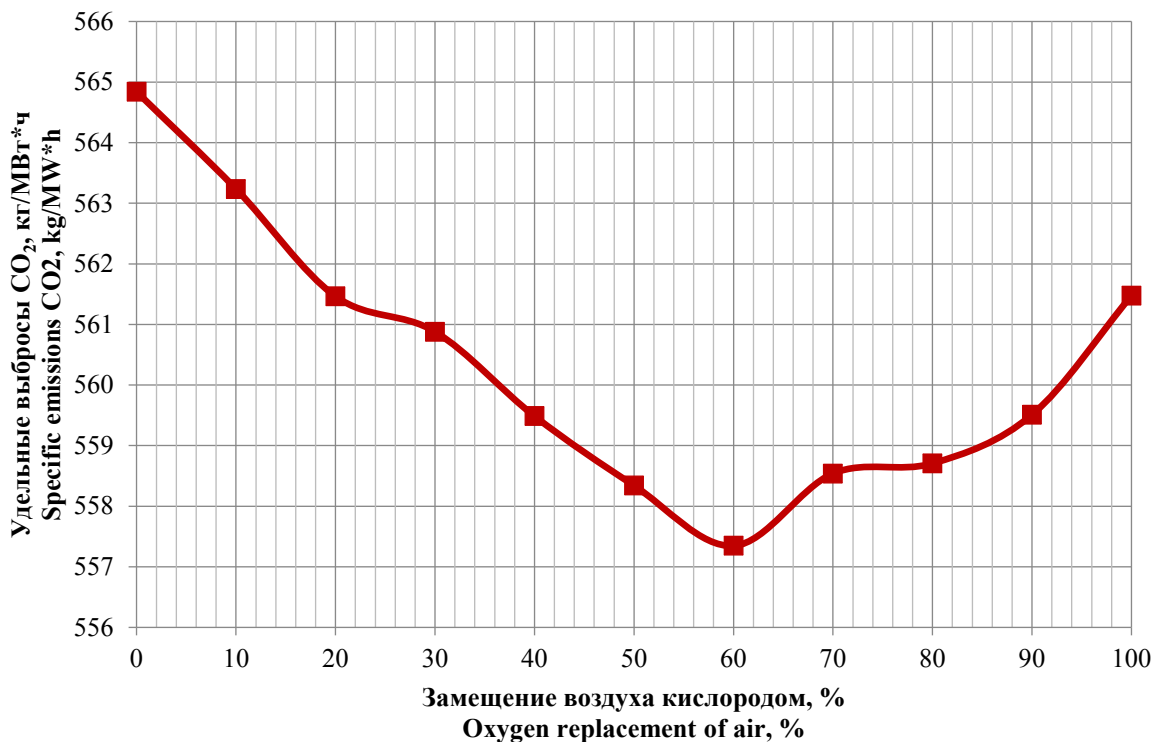


Рис. 7. Зависимость удельных выбросов CO₂ от доли замещения воздуха кислородом.
 Fig. 7. Dependence of specific CO₂ emissions on the share of air replacement with oxygen.

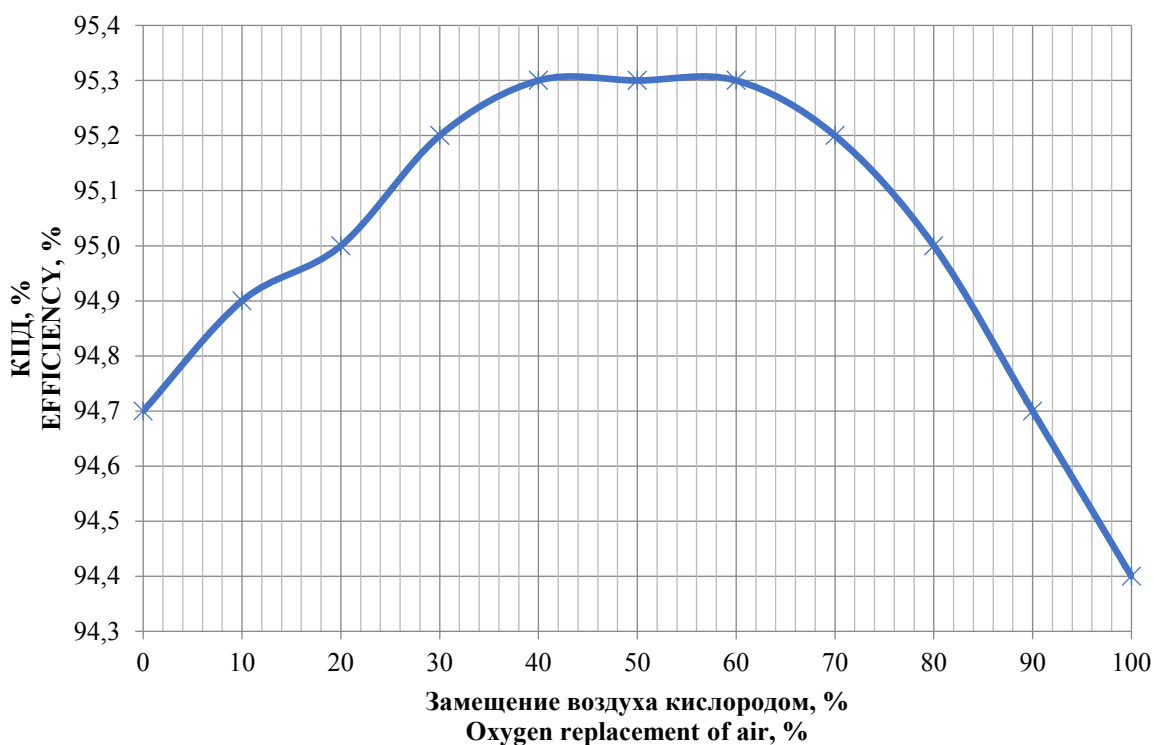


Рис. 8. Зависимость КПД котлоагрегата от доли замещения воздуха кислородом.
 Fig. 8. Dependence of boiler unit efficiency on the proportion of air replacement with oxygen.

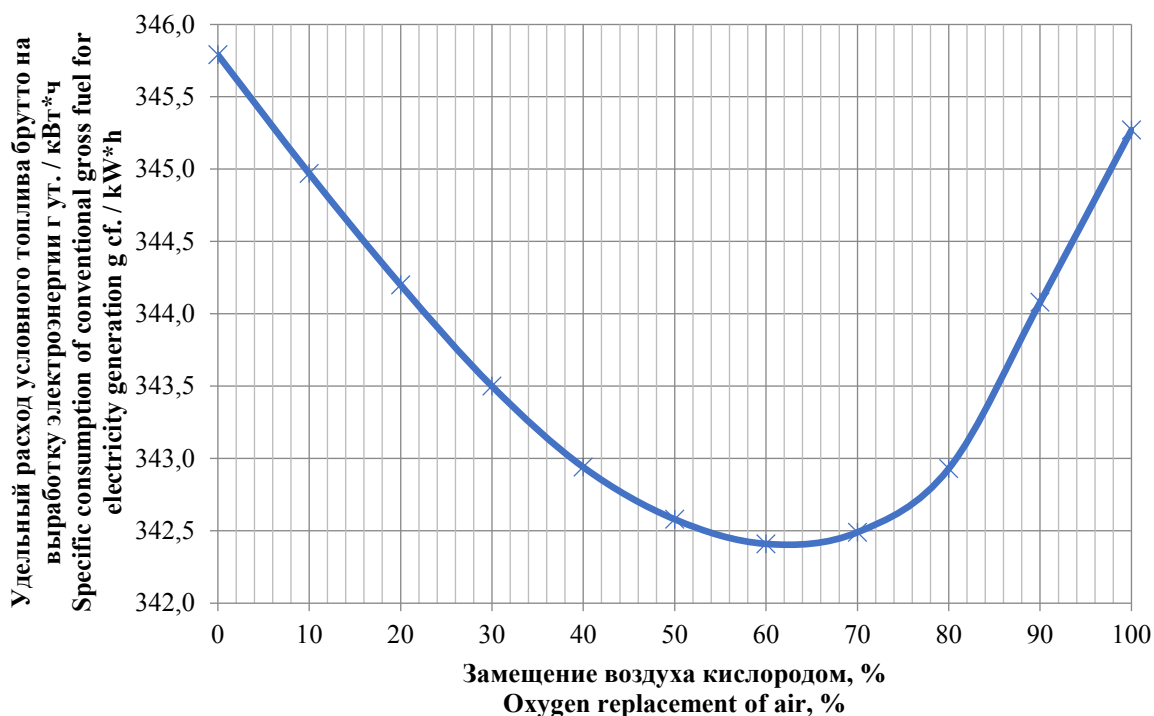


Рис. 9. Зависимость удельного расхода условного топлива брутто на выработку электроэнергии от доли замещения воздуха кислородом.

Fig. 9. Dependence of the specific consumption of gross equivalent fuel for electricity generation on the share of replacement of air with oxygen.

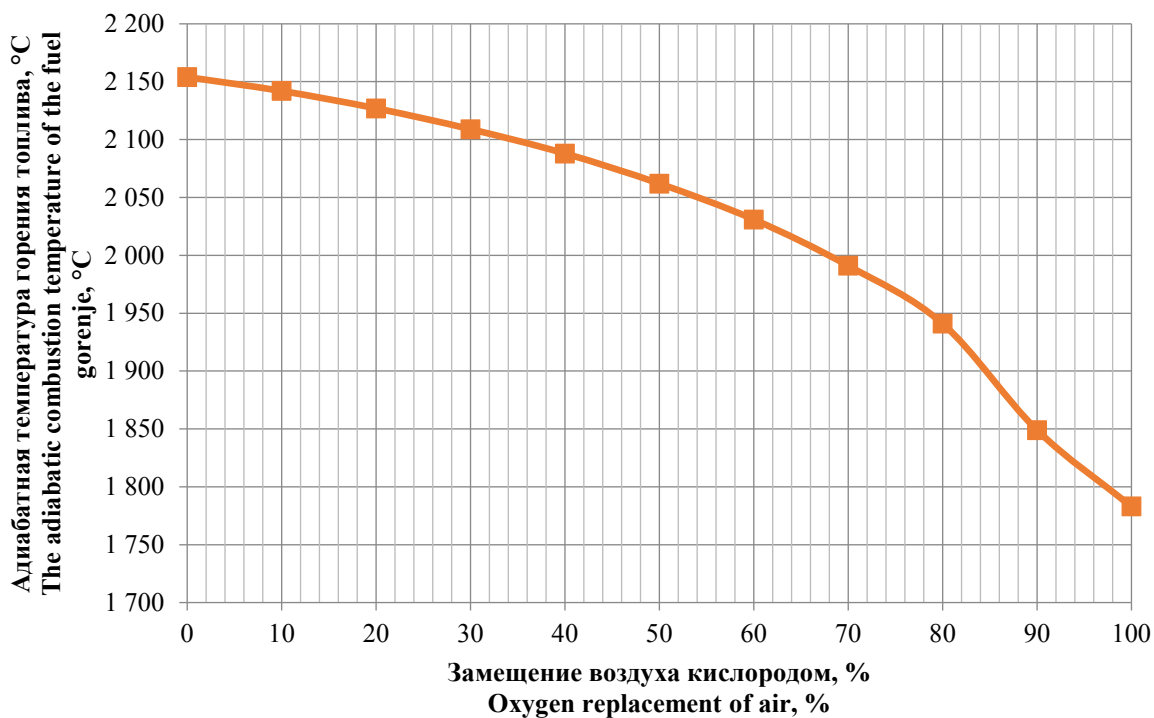


Рис. 10. Зависимость адиабатной температуры горения от доли замещения воздуха кислородом.

Fig. 10. Dependence of adiabatic combustion temperature on the fraction of air replacement with oxygen.

Анализ результатов исследования показывает, что с повышением доли замещения воздуха кислородом существенно уменьшается расход уходящих газов. Объемный расход при переходе на работу на чистом кислороде снижается более чем в 3.5 раза (рис. 3).

Как отмечалось ранее, это требует организации рециркуляции дымовых газов в топку для поддержания на номинальных значениях скоростей дымовых газов в конвективных поверхностях нагрева котла. Рециркуляция дымовых газов приводит к снижению адиабатной температуры горения топлива в топке. Из рисунка 11 видно, что ее уменьшение нелинейно зависит от процента замещения кислородом воздуха. С ростом процента замещения темп убывания температуры увеличивается. И при работе на чистом кислороде адиабатная температура горения топлива снижается до значения около 1780 °С (при работе на чистом воздухе она равна 2154 °С). Это приводит к ухудшению теплообмена и, как следствие, росту температуры уходящих газов с 142 °С до 367 °С.

Два этих фактора – снижение расхода уходящих газов и рост их температуры – оказывают противоположное влияние на величину потерь теплоты с уходящими газами (q_2). Это отражается в нелинейной зависимости от процента замещения кислородом воздуха как КПД котлоагрегата, так и удельного расхода условного топлива брутто на выработку электроэнергии.

Наблюдается прирост эффективности котлоагрегата при работе на частичном замещении кислородом воздуха в диапазоне от 0 до 80%. Максимальный прирост КПД котлоагрегата составляет 0.6% и находится он в диапазоне доли замещения воздуха кислородом от 40 до 60% (рис. 8).

Зависимость удельного расхода условного топлива брутто на выработку электроэнергии от доли замещения воздуха кислородом имеет более выраженный экстремум. Он находится на значении доли, равном 60%. Снижение составляет 3.4 г ут. / кВт*ч по сравнению с работой энергоблока на чистом воздухе (рис. 9).

Сам по себе переход на кислородное сжигание природного газа не приводит к снижению массового расхода выбрасываемого CO_2 (рис. 6). Однако из-за существенного снижения количества азота в составе дымовых газов концентрация углекислого газа в них возрастает с 9.1 до 33.1% объемных и с 14.6 до 54.3%

массовых (рис. 4 и 5). Это достаточно для эффективного улавливания CO_2 из потока дымовых газов. При работе на чистом кислороде дымовые газы представляют собой практически двухкомпонентную смесь из водяных паров и углекислого газа (концентрация прочих газов менее 3%). Это открывает перспективы для получения CO_2 высокой степени чистоты путем конденсации водяных паров из уходящих газов.

Дополнительно введенный параметр – удельные выбросы CO_2 – также достигает минимального значения (около 557 кг/МВт*ч) при доле замещения воздуха кислородом 60%.

Отдельно отметим, что снижение адиабатной температуры горения топлива имеет и положительный эффект – снижается образование оксидов азота NO_x , на борьбу с которыми в энергетических котлах тратятся значительные усилия (разработка специальных горелочных устройств, режимная наладка и т.д.).

Выводы

В этом исследовании была доработана математическая модель паротурбинного энергоблока Т-145/160-130 с паровым котлом ТГМ-94. Создание модели проводилось с использованием программного продукта Boiler Designer.

Математическая модель была доработана путем обнуления присосов воздуха в газовый тракт котла, заменой регенеративного воздухоподогревателя на трубчатый и обвода воздухоподогревателя по дымовым газам при работе на смеси кислорода с воздухом.

Исследование подтвердило, что работа энергоблока Т-145/160-130 с замещением воздуха кислородом, вплоть до режима на чистом кислороде технически возможна при использовании штатной системы рециркуляции дымовых газов для компенсации снижения объема продуктов сгорания в конвективных поверхностях нагрева. Это необходимо для восстановления скорости среды и сохранения на приемлемом уровне коэффициента теплопередачи. В исследовании принята следующая схема работы. Часть дымовых газов отбирается перед воздухоподогревателем и направляется дымососами рециркуляции в топку. Процент рециркуляции определяется из условия компенсации объема продуктов сгорания. Для того, чтобы не допустить пережога трубок воздухоподогревателя из-за значительного

снижения расхода нагреваемой среды, при работе на чистом кислороде и смеси кислорода с воздухом было принято решение отключать воздухоподогреватель путем обвода его по дымовым газам.

Численные исследования сжигания природного газа в кислороде на энергоблоке Т-145/160-130 показали прирост эффективности котлоагрегата при работе на частичном замещении кислородом воздуха в диапазоне от 0 до 80%. Максимальный прирост КПД котлоагрегата составляет 0,6% и находится он в диапазоне доли замещения воздуха кислородом от 40 до 60%.

Зависимость удельного расхода условного топлива брутто на выработку электроэнергии от доли замещения воздуха кислородом имеет более выраженный экстремум. Он находится на значении доли, равном 60%. Снижение составляет 3.4 г ут. / кВт*ч по сравнению с работой энергоблока на чистом воздухе.

Сам по себе переход на кислородное сжигание природного газа не приводит к снижению массового расхода выбрасываемого CO₂. Однако, из-за существенного снижения количества азота в составе дымовых газов концентрация углекислого газа в них возрастает с 9.1 до 33.1% объемных и с 14.6 до 54.3% массовых. Этого достаточно для эффективного улавливания CO₂ из потока дымовых газов. При работе на чистом кислороде дымовые газы представляют собой практически двухкомпонентную смесь из водяных паров и углекислого газа (концентрация прочих газов менее 3%). Это открывает перспективы для получения CO₂ высокой степени чистоты путем конденсации водяных паров из уходящих газов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00257, <https://rscf.ru/project/24-29-00257/>

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

[1] Gülen S.C., Curtis M. Gas Turbine's Role in Energy Transition. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2024, vol. 146, no. 10, pp. 101008. doi: 10.1115/1.4064800

[2] Allam R., Martin S., Forrest B., Fetvedt J., Lu X., Freed D., Brown G.W., Sasaki T., Itoh M., Manning J. Demonstration of the Allam Cycle: An Update on the Development Status of a High Efficiency Supercritical Carbon

Dioxide Power Process Employing Full Carbon Capture. *Energy Procedia*, 2017, no. 114, pp. 5948- 5966. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1731

- [3] Allam R., Palmer M., Brown G.W., Fetvedt J., Freed D., Nomoto H., Itoh M., Okita N., Jones J.Ch. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide. *Energy Procedia*, 2013, no. 37, pp. 1135-1149. doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.211
- [4] Pint B.A., Su Y.F., Lance M.J., Pillai R., Keiser J.R. Internal carburization and scale formation on austenitic steels in supercritical carbon dioxide. *Materials at High Temperatures*, 2024, vol. 40, no. 4, pp. 308-317. doi: 10.1080/09603409.2023.2219875
- [5] Pint B.A., Lance M.J., Pillai R., Keiser J.R. Effect of Impurities on the Compatibility of Steels in Supercritical CO₂ at 450-650 °C. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2024, vol. 146, no. 9, pp. 091007. doi: 10.1115/1.4064585
- [6] Cho J., Choi M., Baik Y., Lee G., Ra H., Kim B., Kim M. Development of the turbomachinery for the supercritical carbon dioxide power cycle. *International Journal of Energy Research*, 2016, vol. 40, no. 5, pp. 587-599. doi: 10.1002/er.3453
- [7] Li Y., Zhang E., Feng J., Zhang X., Yue L., Bai B. Reduced-dimensional prediction method for the axial aerodynamic forces in the off-design operation of near-critical CO₂ centrifugal compressors. *Energy*, 2024, vol. 302, pp. 131791. doi: 10.1016/j.energy.2024.131791
- [8] Rogalev A., Grigoriev E., Kindra V., Rogalev N. Thermodynamic optimization and equipment development for a high efficient fossil fuel power plant with zero emissions. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 236, pp. 117592. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.07.067
- [9] Kosoi A.S., Kosoi A.A., Popel' O.S., Zeigarnik Yu. A., Sinkevich M.V., Filippov S.P. An Exergetic Analysis of New Thermodynamic Cycles Involving Carbon Dioxide Capture. *Thermal Engineering*, 2023, vol. 70, no. 7, pp. 496- 516. doi: 10.1134/S0040601523070030
- [10] Chan W., Li H., Li X. Thermodynamic Analysis for the Combined Cooling and Power System of the Allam-LNG Cycle

- Integrated With Organic Rankine Cycle. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2023, vol. 43, no. 17, pp. 6688-6697. doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222225
- [11] Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO₂ power cycles with oxygen combustion of methane. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 234, pp. 121301. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121301
- [12] Dave K., Gangoli R. Thermodynamic analysis of a zero-emission combustion cycle for energy transition. *Cell Reports Physical Science*, 2023, vol. 4, no. , pp. 101514. doi: 10.1016/j.xcrp.2023.101514
- [13] Kotowicz J., Job M., Brzeczek M. A combined cycle power plants with advanced low emission technologies. *Rynek Energii*, 2017, vol. 133, no. 6, pp. 33-40.
- [14] 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: 10.3390/en14102927
- [15] Du Y., Yu Z., Yang C.; Wang H., Sun S. Techno-economic Optimization of the Combined Supercritical Carbon Dioxide and Air Brayton Cycles Driven by Copper-Based Chemical Looping Combustion. *Energy and Fuels*, 2024, vol. 38, no. 3, pp. 2927. doi: 10.1021/acs.energyfuels.3c03810
- [16] Olajire A. CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications - A review. *Energy*, 2010, vol. 35, no. 6, pp. 2610-2628. doi: 10.1016/j.energy.2010.02.030
- [17] Baskaran D., Saravanan P., Nagarajan L., Byun H. An overview of technologies for capturing, storing, and utilizing carbon dioxide: Technology readiness, large-scale demonstration, and cost. *Chemical Engineering Journal*, 2024, vol. 491, pp. 151998. doi: 10.1016/j.cej.2024.151998
- [18] Hekmatmehr H., Esmaeili A., Pourmahdi M., Atashrouz S., Abedi A., Ali Abuswer M., Nedeljkovic D., Latifi M., Farag Sh., Mohaddespour A. Carbon capture technologies: A review on technology readiness level. *Fuel*, 2024, vol. 363, pp. 130898. doi: 10.1016/j.fuel.2024.130898
- [19] 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, vol. 5, pp. S16-S35. doi: 10.1016/j.ijggc.2011.05.020
- [20] 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: 10.1016/j.pecs.2009.04.002
- [21] Bezuglov R.V., Papin V.V., Vedmichev N.A., Volovikov V.Yu. Razrabotka skhemy toplivoprigotovleniya na TES dlya sovместnogo szhiganiya tverdyh othodov i uglya [Development of a fuel preparation scheme at thermal power plants for the co-combustion of solid waste and coal]. *Energy saving and water treatment*, 2023, No. 5 (145). pp. 51-55 (In Russian).
- [22] Jia L., Tan Y., Anthony E.J. Emissions of SO₂ and NO_x during Oxy-Fuel CFB combustion tests in a mini-circulating fluidized bed combustion reactor. *Energy and Fuels*, 2010, vol. 24, no. 2, pp. 910-915. doi: 10.1021/ef901076g
- [23] Gómez-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, vol. 36, no. 4, pp. 444-509. doi: 10.1016/j.pecs.2009.12.002
- [24] Khalid Hamed Elsheikh Elhag Snizhenie vrednyh vybrosov, vkluchaya parnikovye gazy, pri kislorodnom szhiganii tverdogo topliva v cirkuliruyushchem kipyashchem sloe [Reduction of harmful emissions, including greenhouse gases, during oxygen combustion of solid fuel in a circulating fluidized bed]. dis. Ph.D. tech. Sci. – Moscow, 2020. – 118 p. (In Russian).
- [25] Moshkarin A.V. Ocenka pokazatelej raboty odnocilindrovyyh parogazovyh i parosilovyh energoblokov na chastichnyh nagruzkah [Evaluation of performance indicators of single-cylinder combined-cycle and steam-power power units at partial loads]. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2007, no. 2, pp. 3-6. (In Russian).
- [26] Supranov V.M., Batorshin V.A., Shtegman A.V., Mel'nikov D.A. Studying the possibility and advisability of operating a Пπ-1900-25-570KT boiler in an oxyfuel combustion mode. *Thermal Engineering*, 2021, vol. 59, no. 8, pp. 580-588. doi: 10.1134/S0040601512080149

[27]10. Zhang F., Li X., Xie S., Wang J., Wang X. Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of a Laminar Non-Premixed Methane Jet Flame in

Oxygen/Carbon Dioxide Coflow. *Frontiers in Energy Research*, 2022, vol. 10, pp. 847947. doi: 10.3389/fenrg.2022.847947

Сведения об авторах.



Шапошников Валентин Васильевич, канд. техн. наук, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – математическое моделирование тепловых электрических станций.
E-mail: shaposhnikov.valentin@gmail.com



Бутузов Виталий Викторович, д-р техн. наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. Область научных интересов – совершенствование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.
E-mail: ets@nextmail.ru



Кочарян Евгений Валерьевич, канд. техн. наук, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – декарбонизация традиционной энергетики.
E-mail: kocha99@mail.ru



Батько Дмитрий Николаевич, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – математическое моделирование тепловых электрических станций.
E-mail: batkodn@mail.ru



Шелест Никита Андреевич, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – разработка автономных энергокомплексов.
E-mail: shelest.nikita2018@yandex.ru