

Investigation of the Efficiency of using Methane—Hydrogen Mixtures in Fire-Tube Boilers

¹Shaposhnikov V.V., ¹Kocharyan E.V., ¹Leonova T.A., ¹Arushanyan R.R.,
²Bezuglov R.V.

¹Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

²Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

Abstract. The aim of the work is to simulate and analyze the efficiency of combustion of methane-hydrogen mixture in an environment with increased oxygen content, and in the limit - in pure oxygen, in a fire-tube boiler to reduce CO₂ emissions. To achieve this goal, the following problems were solved: development of a mathematical model of a three-pass fire-tube boiler for operation when burning a natural gas and a methane-hydrogen mixture in air and a mixture of air with pure oxygen, a numerical study of the boiler operation when burning a methane-hydrogen mixture with a hydrogen concentration from 0 to 40% and replacing air with oxygen from 0 to 100%, assessing the efficiency of equipment in these modes. The most important result is the confirmation of an increase in the efficiency of the fire-tube boiler when switching to combustion of methane-hydrogen mixture in an environment with increased oxygen content. The significance of the obtained results lies in determining the most effective parameters of equipment operation, contributing to an increase in the efficiency and environmental friendliness of the heat generation process. The study was conducted for two modes: combustion of a methane-hydrogen mixture with a hydrogen concentration of 0 to 40% in air and combustion of a methane-hydrogen mixture with a fixed hydrogen concentration in air with an oxygen concentration in the range from 0 to 100%.

Keywords: oxygen combustion, methane-hydrogen mixture, hydrogen, boiler, natural gas, carbon dioxide, modeling, efficiency.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.09>

UDC: 621.182

Investigarea eficienței utilizării amestecurilor metan-hidrogen în cazanele cu tuburi fierbinți

¹Șapoșnikov V.V., ¹Kociarian E.V., ¹Leonova T.A., ¹Arușanyan R.R., ²Bezuglov R.V.

¹Universitatea Tehnologică de Stat Kuban, Krasnodar, Federația Rusă

²Universitatea Politehnică de Stat Sud-Rusia Platov (NPI), Novocherkassk, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este de a simula și analiza eficiența arderii amestecului metan-hidrogen într-un mediu cu conținut crescut de oxigen și, la limită, în oxigen pur, într-o centrală cu tuburi de fum pentru a reduce emisiile de CO₂. Pentru a atinge acest obiectiv, au fost rezolvate următoarele probleme: dezvoltarea unui model matematic al unei centrale cu tuburi de fum cu trei treceri pentru funcționare la arderea gazelor naturale și a amestecului metan-hidrogen în aer și a unui amestec de aer cu oxigen pur, un studiu numeric al funcționării centralei la arderea amestecului metan-hidrogen cu o concentrație de hidrogen de la 0 la 40% și înlocuirea aerului cu oxigen de la 0 la 100%, evaluarea eficienței echipamentelor în aceste moduri. Cel mai important rezultat este confirmarea creșterii eficienței centralei cu tuburi de fum la trecerea la arderea amestecului metan-hidrogen într-un mediu cu conținut crescut de oxigen. Semnificația rezultatelor obținute constă în determinarea celor mai eficienți parametri de funcționare a echipamentelor, contribuind la creșterea eficienței și a respectului față de mediu al procesului de generare a căldurii. Studiul a fost realizat pentru două moduri: arderea unui amestec metan-hidrogen cu o concentrație de hidrogen de la 0 la 40% în aer și arderea unui amestec metan-hidrogen cu o concentrație fixă de hidrogen în aer cu o concentrație de oxigen în intervalul de la 0 la 100%.

Cuvinte-cheie: ardere cu oxigen, amestec metan-hidrogen, hidrogen, cazan, gaz natural, dioxid de carbon, modelare, eficiență.

Исследование эффективности использования метано — водородных смесей в жаротрубных котлах

¹Шапошников В.В., ¹Кочарян Е.В., ¹Леонова Т.А., ¹Арушанян Р.Р., ²Безуглов Р.В.

¹Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Российская Федерация

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является моделирование и анализ эффективности сжигания метано-водородной смеси в среде с повышенным содержанием кислорода, а в пределе – в чистом кислороде, в

жаротрубном котле для снижения выбросов CO_2 . Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: разработка математической модели трехходового жаротрубного котла для работы при сжигании природного газа и метано-водородной смеси в воздухе и смеси воздуха с чистым кислородом, численное исследование работы котла при сжигании метано-водородной смеси с концентрацией водорода от 0 до 40% и замещении воздуха кислородом от 0 до 100%, оценка эффективности работы оборудования в этих режимах. Наиболее важным результатом является подтверждение повышения эффективности работы жаротрубного котла при переходе на сжигание метано-водородной смеси в среде с повышенным содержанием кислорода. Значимость полученных результатов состоит в определении наиболее эффективных параметров работы оборудования, способствующих увеличению эффективности и экологичности процесса выработки тепловой энергии. В этом исследовании была разработана и верифицирована математическая модель жаротрубного котла. Создание модели проводилось с использованием программного продукта Boiler Designer. Исследование проводилось для двух режимов: сжигание метано-водородной смеси с концентрацией водорода от 0 до 40% в воздухе и сжигание метано-водородной смеси с фиксированной концентрацией водорода в воздухе с концентрацией кислорода в диапазоне от 0 до 100%. При увеличении доли водорода КПД котлоагрегата практически не изменяется в связи с тем, что при уменьшении расхода уходящих газов происходит снижение объемной теплоты сгорания топлива, что приводит к увеличению расхода топлива. При фиксированном количестве водорода и увеличении концентрации кислорода в воздухе происходит прирост КПД котлоагрегата и снижение удельного расхода условного топлива по сравнению с работой на чистом воздухе.

Ключевые слова: кислородное сжигание, водород, метан-водородная смесь, котел, углекислый газ, моделирование, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Водородная энергетика как перспективное направление развития рассматривается с середины 20 века, а исследования в области получения и сжигания водорода ведутся около 200 лет. Со второй половины 2010-х гг. на фоне усиления глобальной экологической стратегии перспективы водородной энергетики снова начинают рассматривать в качестве одного из возможных ключевых направлений трансформирования мировой энергосистемы [1, 2, 3, 4]. Для традиционной энергетики постепенная интеграция водорода в существующие системы подачи природного газа предполагает более осуществимый путь перехода, чем прямой переход на чистый водород. Одним из таких способов применения водорода является использование его в смеси с метаном при сжигании в энергетических котлах (подобные исследования активно проводятся во всем мире, включая Россию) [5, 6, 7, 8].

Интересно, что использование водорода в качестве источника энергии не ново, поскольку это один из основных видов угольного газа, который несколько десятилетий назад широко использовался в бытовой технике в Европе и Соединенных Штатах. Угольный газ представляет собой смесь водорода, монооксида углерода, метана и двуоксида углерода. Процентное содержание водорода в угольном газе может быть очень высоким, до 50 % или даже 80 % [9], и процентное содержание водорода сильно

зависит от способа производства. Поскольку устройства для сжигания когда-то могли работать на топливе, богатом водородом возникает вопрос: какие могут быть сложности при эксплуатации современных горелок котлов на метан-водородном топливе? Дело в том, что технологии газоиспользующего оборудования эволюционировали в соответствии с современными нормами и правилами, которых не существовало десятилетия назад. Поэтому потенциальный перевод газоиспользующих устройств, которые используются сегодня, к сжиганию метано-водородных смесей (МВС) требует многофакторной оценки. Проводятся многочисленные исследования особенностей сжигания МВС в современных горелочных устройствах [10, 11, 12].

Еще одним перспективным направлением снижения вредных выбросов в окружающую среду является так называемое кислородное сжигание топлива (oxyfuel combustion), т.е. использование воздуха, обогащенного кислородом, при сжигании топлива. В этой области активно проводятся многочисленные теоретические и практические исследования [13, 14, 15]. Технология кислородного сжигания позволяет получить дымовые газы с повышенным содержанием CO_2 , а также приобретает все большее значение в сокращении выбросов NO_x и SO_2 [16, 17]. Как указано в работе [18], при реализации метода необходимо обеспечить рециркуляцию части дымовых газов, вводя их в зону горения так,

чтобы создать необходимые температурные условия. Комбинация этих методов дополнительно усложняет задачу расчета параметров работы теплогенерирующего оборудования и требует применения специальных программных средств, например такого комплекса как Boiler Designer. Этот программный комплекс позволяет проводить тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты котлов и успешно себя зарекомендовал при использовании в России и за рубежом.

Рассмотрим подробнее эффекты, которые возникают при использовании МВС с учетом организации кислородного сжигания топлива, и которые требуются учитывать.

Первая проблема, которую необходимо учитывать – это сложности транспортировки и хранения водорода [19, 20, 21]. В работе [22] показано, что содержание даже 50 % H_2 по объему в природном газе не является критичным. При этом используемое оборудование имеет ограничения по качеству и составу газа, связанные с обеспечением безопасности работ и сохранению долгосрочной работоспособности системы газоснабжения. Что касается приборов конечного назначения, то оптимальным диапазоном концентрации водорода в смеси с природным газом считают 10-30% [23]. Т.к. для поддержания постоянной подачи энергии необходимо регулировать скорость подачи смесей в соответствии с требованиями конечных пользователей, ориентируясь на число Воббе. Например, при использовании смеси, содержащей 15% H_2 и 85 % природного газа, расход смеси должен быть увеличен в 1,7 раза, чтобы обеспечить стабильное энергоснабжение. Увеличение расхода повлечет за собой изменения инфраструктуры в системе распределения сети.

Так как объемная низшая теплота сгорания водорода в 3,4 раза меньше, чем у природного газа то, при сохранении тепловой мощности котла с увеличением доли водорода в МВС возрастает объемный расход топливной смеси. То есть использование топлива с повышенным содержанием водорода увеличит нагрузку на систему топливоподачи и работу горелок. При этом при реакции водорода с кислородом расходуется на 20 % меньше кислорода, чем при сжигании метана, с учетом производства одинакового количества энергии [24]. Если использовать воздух, обогащенный кислородом, то.

снижается количество балластного азота в смеси, что также уменьшает общий расход окислителя. В случае использования существующего газогорелочного оборудования для сжигания МВС, рекомендуется не увеличивать объемный расход выше, чем на 10-15 % от нормативного. Важным является то, что с повышением доли замещения воздуха кислородом уменьшается расход уходящих газов. Это требует организации рециркуляции дымовых газов в топку для поддержания номинальных значений скорости дымовых газов в конвективных поверхностях нагрева котла.

Другой важный показатель процесса горения газообразных топлив – нормальная скорость распространения пламени. Эта скорость характеризует физико-химические свойства горючей смеси и не зависит от гидродинамических условий. Для организации стационарного пламени при горении в потоке горючая смесь должна поступать к фронту пламени со скоростью, равной нормальной скорости распространения пламени, исключая условия (скорость подачи газовой смеси), при которых возможен “отрыв пламени” или, наоборот, его обратный проскок навстречу потоку. Скорость распространения пламени при сжигании чистого водорода в 5-6 раз больше скорости распространения пламени природного газа при стандартных условиях. Для стехиометрических метано-воздушных смесей при нормальных условиях по многочисленным литературным данным [25] она определена с наиболее вероятным значением, близким к 0,36 м/с. В то время как для стехиометрических водородо-воздушных смесей при тех же условиях наиболее вероятным значением скорости будет 2,8 м/с. Скорость распространения пламени в смеси с кислородом также повышается. Например, для метан-кислородной смеси она составляет 3,3 м/с. При этом наличие балластных примесей (азот, двуокись углерода) снижает нормальную скорость распространения пламени примерно на 1-1,2 процента с увеличением их содержания на 1 %. [26]

Пределы воспламенения природного газа и водорода также различны. Концентрационная область горения водорода в воздушных смесях существенно шире, чем у природного газа, поэтому добавка водорода в природный газ приводит к увеличению области устойчивого горения такой смеси [27]. Нижний предел

воспламенения изменяется незначительно при увеличении доли водорода, в то время как верхний предел воспламенения смеси природный газ – водород заметно возрастает с увеличением в ней доли водорода. Т.е. область устойчивого горения таких смесей будет шире и это положительный факт.

Различная скорость распространения пламени природного газа и водорода, различная объемная плотность газов, рециркуляция части дымовых газов в топку существенно влияют на температуры уходящих газов и КПД котла [28, 29].

Цель данного исследования заключается в моделировании и анализе эффективности сжигания метано-водородной смеси в среде с повышенным содержанием кислорода, а в пределе – в чистом кислороде, в жаротрубном котле для снижения выбросов CO_2 .

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве объекта исследования выбран трехходовой водогрейный жаротрубно-дымогарный котел (модель UNIMAT UT-L50, производства фирмы BOSCH), номинальной теплопроизводительностью 11200 кВт.

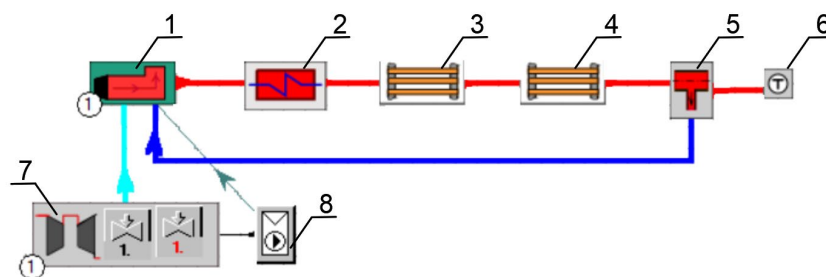
В ходе исследования были проведены расчеты для двух режимов сжигания метано-водородной смеси:

1. Сжигание метано-водородной смеси с концентрацией водорода до 40% при использовании воздуха в качестве окислителя.

2. Сжигание метановодородной смеси с концентрацией водорода 15% в смеси воздуха с кислородом при концентрации кислорода от 0 до 100%.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование сжигания природного газа с различным содержанием водорода производилось в воздушной среде и при замещении воздуха чистым кислородом на номинальной теплопроизводительности котла – 11200 кВт. Основной задачей являлось определение в ходе расчетов зависимости КПД оборудования, температуры уходящих газов, объема выбросов CO_2 , NO_x , H_2O от объемной доли водорода в метановодородной смеси и количества кислорода в окислителе. Математическая модель была разработана в программе Boiler Designer. На первом этапе разработки математической модели была составлена схема водогрейного котла и задание параметров ее элементов в соответствии с данными завода-изготовителя. Верификация математической модели проводилась при работе на природном газе (в качестве окислителя был принят воздух) по данным режимной карты котла для таких параметров как температура дымовых газов, состав дымовых газов, КПД котлоагрегата. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных показали достаточную сходимость, погрешность не превышала 0,5 %.



1 – топка, 2 – поворотная камера, 3 – дымогарные трубы второго хода, 4 – дымогарные трубы третьего хода, 5 – отбор на рециркуляцию, 6 – точка измерения, 7 – подача кислорода, 8 – регулятор подачи кислорода.

Рис. 1. Модель трехходового жаротрубного котла в Boiler Designer.

1 – firebox, 2 – turning chamber, 3 – second-pass smoke tubes, 4 – third-pass smoke tubes, 5 – recirculation, 6 – measuring point, 7 – oxygen supply, 8 – oxygen supply regulator.

Fig. 1. A model of fire-tube boiler in Boiler Designer.

Для исследования работы жаротрубного котла в режиме кислородного сжигания в программе Boiler Designer была дополнительно предусмотрена рециркуляция

дымовых газов из дымогарных труб третьего хода в топку котла. При моделировании режима работы котла в режиме замещения воздуха чистым кислородом часть газов из

дымового тракта отбиралась в топку посредством канала для рециркуляции отходящего газа. Оставшаяся часть дымовых газов отводилась через дымовую трубу.

Процент рециркуляции определялся из условия поддержания коэффициента избытка кислорода, необходимого для горения, а также ограничения адиабатной температуры горения топлива. Исследование проводилось при фиксированной теплопроизводительности котла. Регулирование осуществлялось

изменением расхода топлива, окислителя, а также объема рециркулируемых газов.

Принципиальная расчетная схема модели приведена на рис. 1.

При планировании использования МВС в качестве топлива для котлоагрегата необходимо также учитывать требования ГОСТ на горючие газы, используемые в качестве топлива, действующие в России [30], а также рекомендации завода – изготовителя газоиспользующего оборудования.

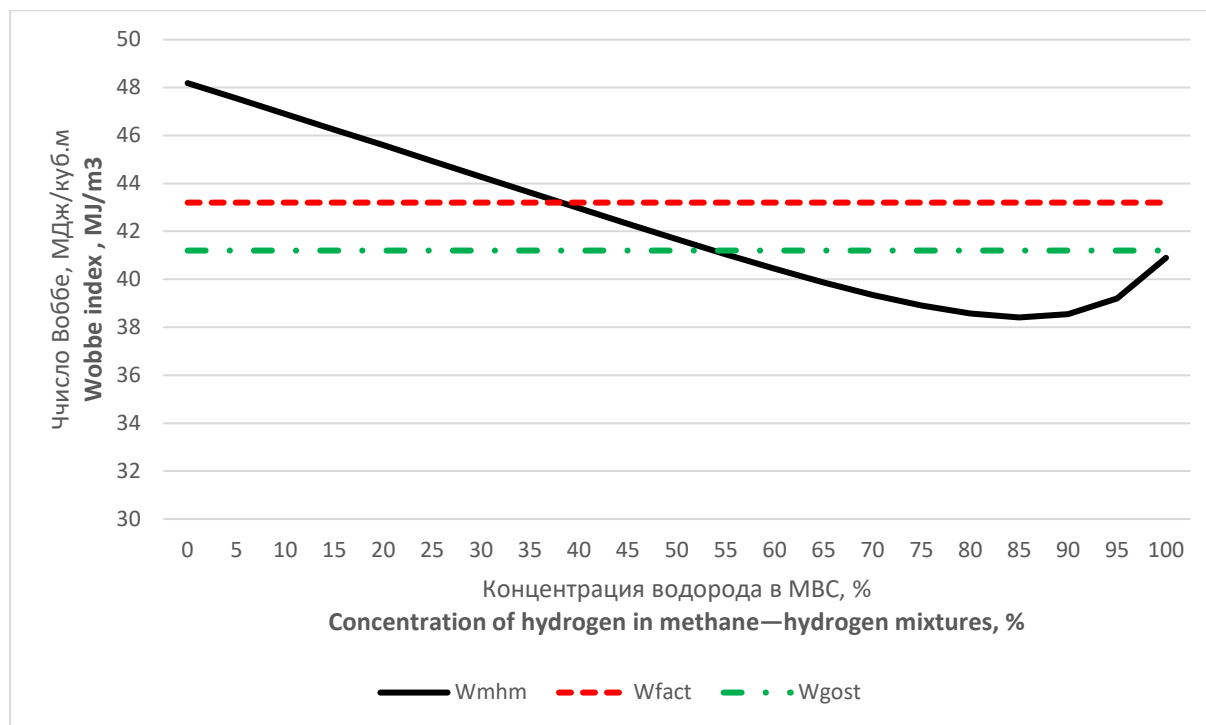


Рис. 2. Зависимость индекса Воббе от концентрации водорода в метан-водородной смеси.
Fig. 2. Dependence of the Wobbe index on the concentration of hydrogen in methane—hydrogen mixtures.

Наиболее важными факторами, как правило, являются теплотворная способность топлива и индекс Воббе.

В соответствии с [5] нижний диапазон значения числа Воббе составляет 41,2 МДж/м³. Рекомендаций завода изготовителя для рассматриваемого котлоагрегата и горелки не установлено, но для котлов того же производителя меньшей мощности [30] рекомендуется использовать топливо с индексом Воббе не ниже 43,2 МДж/м³. На рисунке 2 показано как изменяется индекс Воббе (W_{mhm}) метано-водородной смеси при увеличении доли водорода, а также изображены критические параметры в соответствии с ГОСТ (W_{gost}) и

рекомендациями завода – изготовителя оборудования (W_{fact}).

Из рис. 2 видно, что, опираясь на рекомендации действующих нормативных документов (ГОСТ) верхним пределом концентрации водорода будет значение около 55 %, а по рекомендациям завода изготовителя оборудования – около 35 %.

Отметим, что индекс Воббе имеет точку перегиба при концентрации около 86 % водорода. Т.е. 100 % водорода имеет такой же индекс Воббе, как и смесь 55 % водорода и 45 % природного газа.

Однако топливные свойства этих двух классов топлива, например, воспламеняемость, скорость горения и температура пламени, будут сильно

отличаться, а эффективность горения будет существенно отличаться.

Таблица 1.

Расчет параметров работы котлоагрегата в зависимости от объемной доли водорода
(окислитель - воздух)

Tab.1.

Calculation of boiler unit operation parameters depending on the volume fraction of hydrogen
(oxidizer - air)

Содержание водорода (The proportion of hydrogen)	% об.	0	10	20	30	40
Температура воды на входе в котел (Water temperature at the boiler inlet)	°C	61	61	61	61	61
Температура воды на выходе из котла (Water temperature at the boiler outlet)	°C	89	89	89	89	89
Теплота сгорания топлива (Heat of combustion of fuel)	кДж/кг	48624	49506	50581	51914	53615
Теплота сгорания топлива (Heat of combustion of fuel)	ккал/м³	9090,61	8444,57	7796,69	7147,62	6497,89
Коэффициент избытка воздуха (Excess air ratio)	-	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Расход воздуха на горение (Air consumption)	нм³/ч	11314	11246	11177	11109	11014
Расход уходящих газов (Exhaust gas consumption)	нм³/ч	14008	13957	13909	13868	13803
Расход топлива (Fuel consumption)	нм³/ч	1181,7	1272	1377	1503	1653
Удельный расход условного топлива (Specific consumption of conventional fuel)	кг у.т./Гкал	153,46	153,45	153,37	153,46	153,44
Потери с уходящими газами (Exhaust gas losses)	%	6,31	6,29	6,27	6,25	6,21
КПД котла (Boiler efficiency)	%	93,1	93,09	93,11	93,15	93,18
Адиабатная температура в топке (Adiabatic temperature in the furnace)	°C	1952	1958	1964	1971	1980
Температура дымовых газов на выходе из котла (The temperature of the exhaust gases)	°C	162	162	162	162	162
Содержание CO ₂ в дымовых газах (CO ₂ content in exhaust gases)	% об.	9,15	8,90	8,60	8,25	7,82
Содержание H ₂ O в дымовых газах (H ₂ O content in exhaust gases)	% об.	19,02	19,45	19,93	20,51	21,21
Содержание O ₂ в дымовых газах (O ₂ content in exhaust gases)	% об.	0,907	0,8912	0,8956	0,899	0,8988

Это означает, что, хотя индекс Воббе и фактора взаимозаменяемости топлива для предсказывает тепловую нагрузку, его нельзя устройств сжигания, нужно учитывать и использовать в качестве единственного другие параметры.

Таблица 2.

Расчет параметров работы котлоагрегата в зависимости от степени рециркуляции

Tab.2.

Calculation of boiler unit operation parameters depending on the degree of recirculation

Замещение воздуха кислородом (Proportion of oxygen replacement of air)	–	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Содержание H ₂ (The proportion of hydrogen)	% об.	15	15	15	15	15	15
Теплота сгорания топлива (Heat of combustion of fuel)	кДж/кг	50018	50018	50018	50018	50018	50018
Расход воздуха на горение (Air consumption)	нм ³ /ч	11218	8975	6731	4487	2243	0
Расход кислорода на горение (Oxygen consumption)	нм ³ /ч	0	429	855	1287	1716	2154
Расход рециркулируемых газов (Consumption of recirculated gases)	нм ³ /ч	0	1331,2	2872,7	4383,2	5667	6704,8
Степень рециркуляции (Recycling rate)	–	0	0,11	0,28	0,52	0,86	1,4
Расход уходящих газов (Exhaust gas consumption)	нм ³ /ч	13941	12102	10259	8429	6589	4789
Расход топлива (Fuel consumption)	нм ³ /ч	1323	1311	1299	1290	1278	1275
Удельный расход условного топлива (Specific consumption of conventional fuel)	кг у.т./Гкал	153,49	152,10	150,71	149,66	148,27	147
Потери с уходящими газами (Exhaust gas losses)	%	6,28	5,45	4,65	3,85	3,04	1,04
КПД котла (Boiler efficiency)	%	93,1	93,92	94,72	95,52	96,33	97
Адиабатная температура в топке (Adiabatic temperature in the furnace)	°C	1961	1996	1999	1995	1996	1967
Температура газов на выходе из котла (The temperature of the exhaust gases)	°C	162	159	157	154	150	131
Содержание CO ₂ в дымовых газах (CO ₂ content in exhaust gases)	% об.	8,7	9,9	11,6	14,1	17,8	24,5
Содержание H ₂ O в дымовых газах (H ₂ O content in exhaust gases)	% об.	19,6	22,1	25,5	30,5	38,1	51,6
Содержание O ₂ в дымовых газах (O ₂ content in exhaust gases)	% об.	0,893	0,917	0,921	0,937	0,993	1,01

I. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных расчетов получены зависимости объемных

концентраций компонентов CO₂, NO_x, H₂O в дымовых газах, теплоты сгорания топлива, расходы дымовых газов, объемной теплоты сгорания топлива, КПД оборудования и

удельного расхода условного топлива на выработку тепловой энергии от объемной доли водорода в топливной смеси при сжигании топливной смеси в воздушной среде (табл.1) и организации рециркуляции дымовых газов при фиксированном значении концентрации водорода 15 % и использовании обогащенного кислородом воздуха (табл.2).

Анализ результатов исследования показывает, что с повышением доли водорода в топливной смеси до 40 % концентрация CO_2 снижается на 1,33 %. При увеличении доли водорода КПД котлоагрегата практически не изменяется. Это связано с тем, что при уменьшении расхода уходящих газов происходит снижение объемной теплоты сгорания топлива, что приводит к увеличению расхода топлива. Т.е. заметного эффекта от замещения водородом природного газа не наблюдается. Значение удельного расхода топлива на выработку тепловой энергии изменяется неравномерно.

В ходе анализа сжигания топливной смеси в воздухе, обогащенном кислородом, наблюдается повышение КПД котлоагрегата на 3,9 %. Это приводит к уменьшению удельного расхода условного топлива на выработку тепловой энергии. Максимальное снижение составляет 6,46 кг у.т./Гкал·ч по сравнению с работой котла на природном газе и 6,49 кг у.т./Гкал·ч по сравнению с работой котла на МВС с окислителем воздух.

Также замещение воздуха кислородом приводит к снижению расхода уходящих газов на 65,6 % (9153 м³/ч) и увеличению концентрации CO_2 в дымовых газах на 15,8 %, что способствует возможности организации 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.

Выводы

В работах [13, 15] показана возможность снижения вредных выбросов в окружающую среду за счет организации кислородного сжигания природного газа. В работах [22, 29] также показано, что применение метан-водородных смесей в качестве топлива котлоагрегатов снижает выбросы CO_2 . В

настоящей работе на основе разработанной модели с использованием программного продукта Boiler Designer исследована эффективность сжигания в жаротрубном котле метано-водородной смеси с концентрацией водорода от 0 до 40 % в воздухе и сжигание топлива с фиксированным содержанием водорода при замещении воздуха чистым кислородом в диапазоне от 0 до 100 % потребности в нем.

Показано, что использование метан-водородных смесей в качестве топлива в комбинации с кислородным сжиганием позволяет более дополнительно снизить выбросы парниковых газов в окружающую среду по сравнению с технологиями, применяющими эти методы по отдельности. Полученные при указанных выше условиях значения объемных концентраций компонентов CO_2 , NO_x , H_2O в дымовых газах, теплоты сгорания топлива, расходы дымовых газов, объемной теплоты сгорания топлива, КПД оборудования и т.д. подтверждают возможность эффективного совместного использования этих технологий.

Кроме того, в работе показано, что при планировании использования МВС в качестве топлива для котлоагрегата верхним пределом концентрации водорода целесообразно принять значение равное 35 %, исходя из рекомендаций завода – изготовителя газоиспользующего оборудования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

Литература (References)

- [1] Makarov A.A., Kulagin V.A., Grushevenko D.A., Galkina A.A. Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2024 [World and Russian energy development forecast 2024]. Moscow, 2024. 208 p. (In Russian).
- [2] Kulagin V.A., Grushevenko D.A. Smozhet li vodorod stat toplivom budushhego? [Can hydrogen become the fuel of the future?] *Thermal Engineering*, 2020, no. 4, pp. 3-17. (In Russian).
- [3] Collins L. Why hydrogen-fired power plants will play a major role in the energy transition. 2021. Available at: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/why-hydrogen-fired-power-plants-will-play-a-major-role-in-the-energy-transition/2-1-1045768> (accessed 06.04.2025)
- [4] IRENA Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I — Trade outlook for 2050 and

- way forward, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022, 114 p.
- [5] 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: 10.1016/j.enconman.2024.118946
- [6] 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>
- [7] Schaffert, J.; Fischer, P.; Leicher, J.; Burmeister, F.; Flayyih, M.; Cigarida, H.; Albus, R.; Görner, K.; Mili, P.; Carpentier, S. Impact of Hydrogen Admixture on Combustion Processes—Part II: Practice. *THyGA Project*, 2020. Available at: https://thyga-project.eu/wp-content/uploads/20201211-D2.3-Impact-of-Hydrogen-in-Practice_final.pdf (accessed 06.04.2025)
- [8] Taymarov M.A., Ilyin V.K., Chiklyaev E.G., Sungatullin R.G. Features of application of the methane-hydrogen fraction as fuel for thermal power plant boilers *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019, vol.21, no.3 pp. 109-116. (In Russian). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-109-116
- [9] Zhao, Y., McDonell, V., & Samuelsen, S.. Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cooktop burner. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. no. 44 pp. 12239-12253. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.100
- [10] Schefer R.W., Wicksall D.M., Agrawal A.K. Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl burner. 2002 doi: 10.1016/S1540-7489(02)80108-0
- [11] Celtek MS, Pinarbas A. Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.107
- [12] Weiguo Pan, Lianwei Kang, Zhwei Chi, Wenhuan Wang, Congwei Tang. Numerical study on effects of hydrogen doping of natural gas on the combustion characteristics in micro gas turbine combustor. *Applied Thermal Engineering*, 2024, Vol.255. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123989
- [13] 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:10.1016/j.ijggc.2011.05.020.
- [14] 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: 10.3389/fenrg.2022.847947.
- [15] Komaki A., Gotou T., Uchida T., Yamada T. Operation Experiences of Oxyfuel Power Plant in Callide Oxyfuel Project. *Energy Procedia*, 2014, vol. 63, pp. 490-496. doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.053
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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
- [19] Collis J., Schomacker R. Determining the Production and Transport Cost for H₂ on a Global Scale *Frontiers in Energy Research*, 2022, vol. 10. doi: 10.3389/fenrg.2022.909298
- [20] Assessment of Hydrogen Delivery Options *European Union, 2021 — JRC124206* Available at: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2021-06/jrc124206_assessment_of_hydrogen_delivery_options.pdf (accessed 06.04.2025)
- [21] Li J., Song F., Zhang X. A review on hazards and risks to pipeline operation under transporting hydrogen energy and hydrogen-mixed natural gas *Decarbonizing Energy Systems: Smart Grid and Renewable Technologies*, 2024, vol. 79. <https://doi.org/10.2516/stet/2024004>
- [22] Gondal I. A. Hydrogen integration in power-to-gas networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 3, pp. 1803–1815. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.11.164
- [23] Glanville, P.; Fridlyand, A.; Sutherland, B.; Liskza, M.; Zhao, Y.; Bingham, L.; Jorgensen, K. Impact of Hydrogen/Natural Gas Blends on Partially Premixed Combustion Equipment: NO_x Emission and Operational Performance. *Energies* 2022, vol. 15. <https://doi.org/10.3390/en15051706>
- [24] Savitenko M.A., Rybakov B.A. Primenenie vodoroda v energetike: voprosy ekologii [Hydrogen use in energy: environmental issues.] *Turbines and diesel engines*, 2021, vol. 94, no.1, pp. 10-16. (In Russian).
- [25] Savitenko M.A., Rybakov B.A. Szhiganie vodorodosoderzhashhego gaza v vodorodnykh i parovykh kotlakh [Combustion of hydrogen-containing

gas in hydrogen and steam boilers.] *ANO Hydrogen Technological Solutions* (In Russian). Available at: <https://ww-h2.com/services/combustion-of-hydrogen-containing-gas-in-hydrogen-and-steam-boilers/> (accessed 06.04.2025)

- [26] Starikov A. N. Osnovy teorii gorenija i vzryva [Fundamentals of the theory of combustion and explosion] (Russ. ed.: Starikov A. N. Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stole-tov. – Vladimir: VISU Publishing House, 2019. 148 p.)
- [27] Roslyakov P.V., Rybakov B.A., Savitenko M.A., Ionkin I.L., Luning B. Ocenki vozmozhnostej snizheniya vybrosov parnikovyx gazov pri szhiganii topliv v kotlax TE'S i kotelnyx [Assessment of the possibilities of reducing greenhouse gas emissions from fuel combustion in thermal power plant boilers and boiler houses] *Thermal Engineering*, 2022, no. 9, pp. 97-106. (In Russian).
- [28] Malenkov A.S., Kharlamova D.M., Naumov V.Yu., Karev T.P. Features of methane-hydrogen mixtures combustion in oxy-fuel power cycle

combustion chamber *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2022, no. 1045 doi: 10.1088/1755-1315/1045/1/012143

- [29] D.T. Bălănescu, V.M. Homutescu. Effects of hydrogen-enriched methane combustion on latent heat recovery potential and environmental impact of condensing boilers. *Applied Thermal Engineering*, 2021, Vol. 197. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117411
- [30] GOST 5542–2014 *Mezhhgosudarstvennyj standart. Gazy goryuchie prirodnye promyshlennogo i kommunalno-bytovogo naznacheniya. Texnicheskie usloviya*. [Interstate Standard 5542 – 2014. Combustible natural gases for industrial and municipal purposes. Technical conditions.] Moscow, Standartinform Publ., 2015. 12 p.
- [31] *Instrukciya po ekspluatácii. Gazovyy napolnyj kotel Buderus Logano GE434-325* [Operating instructions. Gas floor boiler Buderus Logano GE434-325.] Available at: <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/buderus/gazovye-napolnye-kotly/1213> (accessed 06.04.2025)

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



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



Безуглов Роман Владимирович, доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Область научных интересов – математическое моделирование. E-mail: bezuglov@npi-tu.ru



Леонова Татьяна Александровна, магистр, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – декарбонизация традиционной энергетики. E-mail: tatyanka2000@inbox.ru



Арушанян Рубен Рафаэлович, старший преподаватель, Кубанский государственный технологический университет. Область научных интересов – математическое моделирование процессов теплофизики. E-mail: rubenarushanyan@gmail.com