

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81>ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПОСЛЕ ЗАМЕНЫ МЕТАНА СМЕСЬЮ  
МЕТАНА С ВОДОРОДОМ ИЛИ ПРОПАН-БУТАНОВЫМ ТОПЛИВОМ

Научная статья

Назарычев С.А.<sup>1,\*</sup>, Ларионов В.М.<sup>2</sup>, Ларионова И.В.<sup>3</sup><sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-6485-7167;<sup>2</sup>ORCID : 0000-0002-6081-6461;<sup>1,2</sup> Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация<sup>3</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (nazarichev.sa[at]gmail.com)

**Аннотация**

Данная работа посвящена оптимизации процесса горения углеводородных топлив переменного состава. Использовалась лабораторная модель водонагревательной установки, позволяющей обеспечить устойчивое горение смеси метана с водородом или пропан-бутановым топливом в интервале концентраций примесей к метану от 0 до 26%. Начальный режим работы установки соответствует горению стехиометрической смеси метана с воздухом с заданной начальной разностью температур воды на входе и выходе теплообменника. Добавка к метану водорода или пропан-бутанового топлива приводит к снижению начальной разности температур воды или неполному сгоранию топлива, соответственно. Фиксируется концентрация примесей к метану и производятся изменения расхода топлива и воздуха. Процесс оптимизации завершается, когда разность температур воды становится равной начальному значению. Анализ показал, что в этом случае смесь топлива с воздухом имеют практически стехиометрический состав. На основании известной математической модели проведен расчет оптимальных расходов топлива и воздуха в зависимости от концентраций примесей к метану. Расхождение результатов расчета и эксперимента не превышают 3%.

**Ключевые слова:** водонагревательная установка, углеводородное топливо, переменный состав, смеси, метан-водород, метан-пропан-бутан, оптимизация горения.

OPTIMIZATION OF WATER HEATING PLANT OPERATION AFTER METHANE REPLACEMENT WITH  
METHANE-HYDROGEN MIXTURE OR PROPANE-BUTANE FUEL

Research article

Nazarychev S.A.<sup>1,\*</sup>, Larionov V.M.<sup>2</sup>, Larionova I.V.<sup>3</sup><sup>1</sup>ORCID : 0000-0001-6485-7167;<sup>2</sup>ORCID : 0000-0002-6081-6461;<sup>1,2</sup> Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation<sup>3</sup> Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, Kazan, Russian Federation

\* Corresponding author (nazarichev.sa[at]gmail.com)

**Abstract**

This work is dedicated to the optimization of the combustion process of hydrocarbon fuels of variable composition. A laboratory model of a water-heating plant was used to ensure stable combustion of a mixture of methane with hydrogen or propane-butane fuel in the range of methane impurity concentrations from 0 to 26%. The initial operating mode of the unit corresponds to combustion of a stoichiometric mixture of methane with air with a given initial temperature difference between water at the inlet and outlet of the heat exchanger. Addition of hydrogen or propane-butane fuel to methane leads to decrease of initial water temperature difference or incomplete combustion of fuel, respectively. The concentration of impurities to methane is fixed and changes in fuel and air flow rates are made. The optimization process is completed when the water temperature difference becomes equal to the initial value. The analysis has shown that in this case the mixture of fuel and air have almost stoichiometric composition. On the basis of the known mathematical model the calculation of optimal fuel and air flow rates depending on the concentrations of methane impurities was carried out. The discrepancy between the calculation and experimental results does not exceed 3%.

**Keywords:** water heating plant, hydrocarbon fuel, variable composition, mixtures, methane-hydrogen, methane-propane-butane, combustion optimization.

**Введение**

Одним из направлений решения задач энерго- и ресурсосбережения является использование альтернативных видов топлива, например, синтез газа, биогаза, попутного нефтяного газа (ПНГ) или промышленных отходов, получаемых в процессе переработки нефтяного сырья [1], [2].

В настоящее время изучается возможность использования ПНГ и смеси природного газа с водородом, содержащемся в ряде нефтехимических отходов, в действующих тепловых энергетических установках [3], [4].

Замена природного газа альтернативным топливом может привести к нарушению стабилизации пламени. Изменяются условия оптимальной работы энергетической установки, содержащиеся в инструкции по эксплуатации,

например, в Режимной карте паровых и водогрейных котлов. Кроме того, необходимо иметь в виду, что состав ПНГ и водородосодержащих отходов может изменяться с течением времени.

В работах [5], [6] была разработана математическая модель, позволяющая оптимизировать процесс горения смесей углеводородов метанового ряда в случае изменения удельной теплоты сгорания топлива. Целью оптимизации было нахождение расходов топлива и воздуха, для которых заданная скорость тепловыделения, которая была до изменения удельной теплоты сгорания, достигалась при полном сгорании и минимальном расходе топлива.

Было показано, что после изменения объемной теплоты сгорания топлива (УТС) на некоторую относительную величину для оптимизации процесса горения необходимо изменить расход топлива на ту же относительную величину, но в противоположном направлении. Расход воздуха остается постоянным.

В работах [7], [8] были получены зависимости УТС и оптимальных расходов смесей метана с водородом или пропан-бутановым топливом от концентраций примесей к метану.

Однако, достоверность полученных теоретических результатов пока не подтверждена экспериментально.

Цель данной работы – экспериментальное и теоретическое определение условий оптимального горения смесей метана с водородом или пропан-бутановым топливом в водонагревательных установках. Использовалась лабораторная водонагревательная установка (рис. 1). Полное описание экспериментального стенда дано в работах [9], [10].

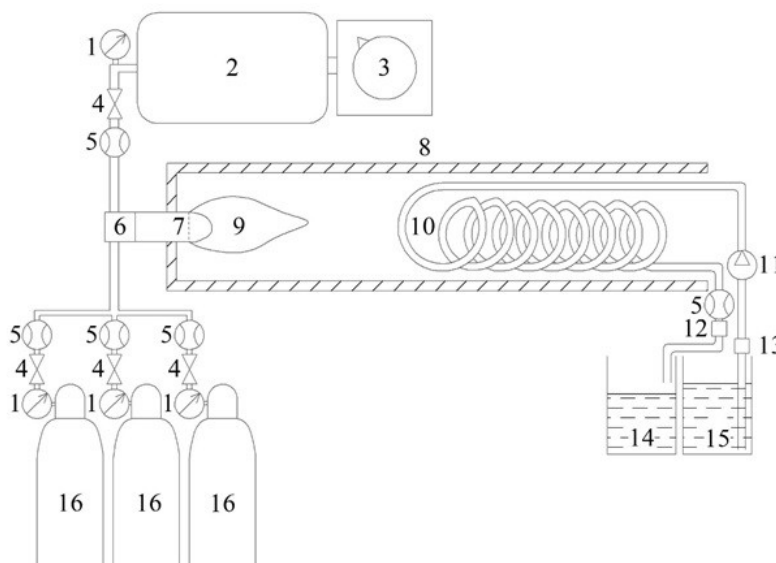


Рисунок 1 - Схема экспериментального стенда

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.1>

*Примечание:* 1 – манометр; 2 – воздуходувное устройство; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – вентиля, регулирующие подачу газов в установку; 5 – расходомеры; 6 – смеситель; 7 – горелочное устройство; 8 – камера сгорания; 9 – пламя; 10 – теплообменник; 11 – водяной насос; 12, 13 – цифровой датчик температуры (тип DS18S20); 14 – бак с горячей водой; 15 – бак с холодной водой; 16 – газовые баллоны (метан, пропан-бутан, водород)

### Основные результаты

Анализ состава используемых газов проводился на лабораторном хроматографе ЛХМ-80. Результаты определения компонентного состава газов представлены в Таблицах 1-3.

Таблица 1 - Химический состав баллонного метана (газ под давлением)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.2>

Состав газа	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (бутан)	H <sub>2</sub> S	O <sub>2</sub>
Содержание, %	93,84	1,29	0,86	0,54	2,9	0,57

Таблица 2 - Химический состав технического пропан-бутанового топлива (газ под давлением)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.3>

Состав газа	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (бутан)	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (изобутан)	H <sub>2</sub> S	O <sub>2</sub>
Содержание, %	75	6,9	8,77	4,13	5,2

Таблица 3 - Химический состав баллонного водорода (газ под давлением)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.4>

Состав газа	H <sub>2</sub>
Содержание, %	99,99

С учетом этих данных нормативным методом теплового расчета котлов были определены значения низшей объемной теплоты сгорания и количество воздуха, необходимого для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> используемых газов (Таблица 4).

Таблица 4 - Значения объемной теплоты сгорания и количество воздуха, необходимого для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> используемых газовDOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.5>

Газ	Объемная теплота сгорания (низшая), q, кДж/м <sup>3</sup>	Объем воздуха, для полного сгорания 1 м <sup>3</sup> , V <sub>0</sub> , м <sup>3</sup>
Метан	36644,33	9
Пропан-бутан	90222,33	22,75
Водород	10790	2,38

В результате предварительных испытаний было установлено, что расход метана 1,8 л/мин, расход воздуха 17,5 л/мин, расход воды в теплообменнике 0,54 л/мин, соответствуют оптимальному режиму горения (коэффициент избытка воздуха  $\alpha=1$ ) с разницей выходной и входной температур воды 21,5 °С и позволяет довести концентрацию примесей к метану до 26 %, сохраняя устойчивость пламени.

При постоянном расходе топлива  $V_f = V_{m,0}=1,8$  л/мин и воздуха  $V_a=V_{a,0}=17,5$  л/мин наличие примесей к метану изменяет характер горения. Если концентрация примеси к метану  $\eta$ , то расход метана  $V_m=V_{m,0}(1-\eta)$ , а расход примеси  $V_{m,0}\cdot\eta$ . Тогда с учетом значений объема воздуха  $V_0$ , необходимых для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> каждого используемого топлива, коэффициент избытка воздуха смеси метана с водородом или с пропан-бутановым топливом определяется следующими соотношениями:

$$\alpha = \frac{1}{1-0,755\eta_h}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{1+1,345\eta_p}. \quad (2)$$

При тех же постоянных расходах топлива и воздуха были проведены измерения разности температур воды в теплообменнике в зависимости от концентрации пропан-бутана или водорода в смеси с метаном. Результаты вычислений по формулам (1-2), представленные на рис.2 и экспериментальные данные (рис.3) показали следующее. При постоянных расходах топлива и воздуха, постоянном расходе воды, увеличение концентрации водорода в смеси с метаном до 26% приводит к тому, что начальный ( $\eta=0$ ) оптимальный ( $\alpha=1$ ) режим горения становится не оптимальным ( $\alpha=1,24$ ). Выходная температура воды уменьшается на 2 °С относительно начального значения. При постоянном расходе топлива и воздуха, постоянном расходе воды увеличение концентрации пропан-бутанового топлива в смеси с метаном до 26% приводит к тому, что начальный оптимальный режим горения становится неоптимальным ( $\alpha=0,74$ ), вследствие неполноты сгорания топлива. Выходная температура воды в начальный момент времени повышается на 0,5 °С, затем ( $\alpha=0,84$ ) начинает быстро уменьшаться.

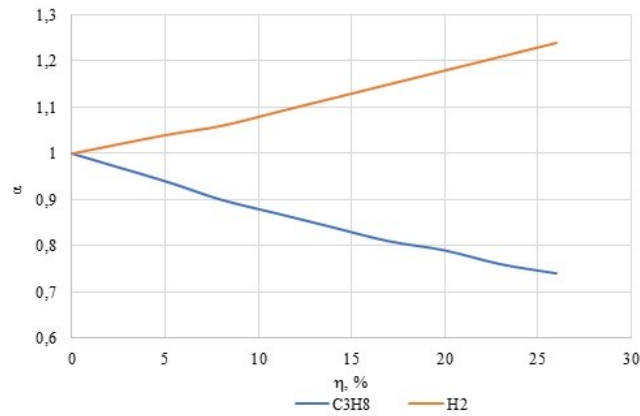


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента избытка воздуха смеси метана с водородом или метана с пропан-бутановым топливом от концентраций добавляемых газов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.6>

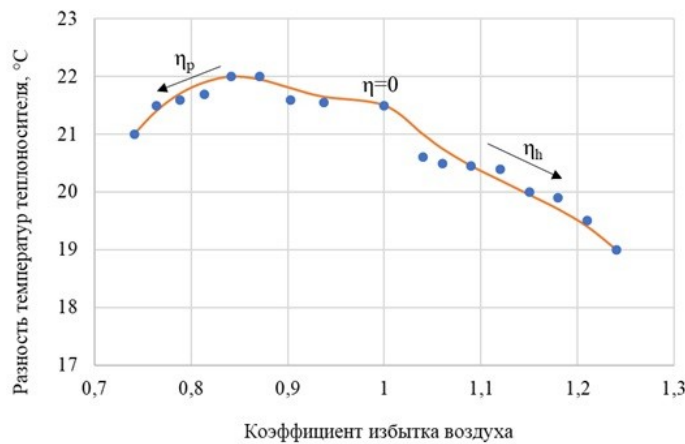


Рисунок 3 - Изменение разности температур воды в зависимости от коэффициента избытка воздуха  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.7>

Примечание:  $\eta_h$  – концентрация водорода,  $\eta_p$  – концентрация пропан-бутана в смеси с метаном

Итак, добавление к метану водорода или пропан-бутанового топлива приводит к тому, что режим горения становится неоптимальным (рис. 2, рис. 3).

Оптимизация режима работы нагревательной установки проходила при постоянном первоначальном расходе воздуха. В качестве примера рассмотрим неоптимальный режим горения смесей метана с водородом:  $\eta=26\%$ ,  $V_{f,0}=1,8$  л/мин,  $\alpha=1,24$ ,  $\Delta t_w=19$  °C. Расход метана и водорода изменялся таким образом, что расход смеси увеличивался при условии  $\eta=const$ . Измерения показали (рис. 4), что заданная разность температур воды  $\Delta t_{w,0}=21,5$  °C достигается, когда расход смеси увеличивается до 2,2 л/мин. В этом случае расчет показал, что коэффициент избытка воздуха близок к единице.

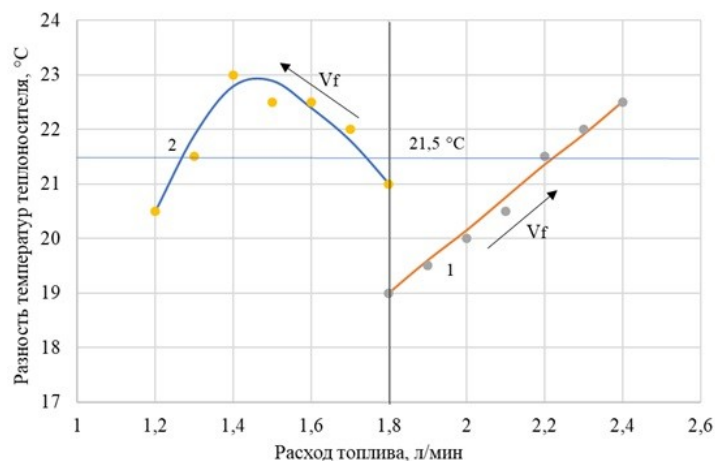


Рисунок 4 - Изменение разности выходной и входной температур воды при изменении расхода смеси метана с водородом (1) или пропан-бутановым топливом (2)  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.8>

Аналогичное исследование было проведено для концентраций водорода от 5% до 23% с шагом 3%. Оказалось, что для всех значений расхода смеси, для которых  $\Delta t_w = 21,5$  °C, значения коэффициента избытка воздуха близки к единице ( $\alpha = 1 \pm 0,02$ ) (Таблица 5).

Таблица 5 - Условия оптимального горения в зависимости от расхода и состава смеси метана с водородом

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.9>

$\eta$ , %	0	5	8	11	14	17	20	23	26
$V_f$ л/мин	1,8	1,85	1,9	1,95	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2
$\alpha$	1,0	1,01	1,01	1,01	1,01	0,99	1,01	0,99	1,02

Примечание:  $Q_{a,0} = 17,5$  л/мин,  $\Delta t_{w,0} = 21,5$  °C

Аналогичный эксперимент был проведен для смеси метана с пропан-бутановым топливом (Таблица 6). В этом случае при постоянном расходе воздуха и концентрации примеси необходимо уменьшить расхода смеси. Если  $\eta = 26\%$  (рис.6) начальная точка ( $\Delta t_w = 21$  °C, расход смеси 1,8 л/мин) соответствует неполному сгоранию топлива ( $\alpha = 0,79$ ). Оптимизация горения происходит при увеличении расхода смеси до 1,3 л/мин.

Таблица 6 - Условия оптимального горения в зависимости от расхода и состава смеси метана с пропан-бутановым топливом

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.10>

$\eta$ , %	0	5	8	11	14	17	20	23	26
$V_f$ л/мин	1,8	1,7	1,65	1,55	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3
$\alpha$	1,0	0,99	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02

Примечание:  $Q_{a,0} = 17,5$  л/мин,  $\Delta t_{w,0} = 21,5$  °C

Согласно, работе [5] оптимизирующие расходы топлива определяются соотношениями:

$$\theta_{f,h}(\eta) = \lambda_h \eta / (1 - \lambda_h \eta), \quad (3)$$

$$\theta_{f,p}(\eta) = -\lambda_p \eta / (1 + \lambda_p \eta), \quad (4)$$

где для метано-водородного топлива  $\lambda_h = 0,7$ , для смесей метана с пропан-бутановым топливом  $\lambda_p = 1,46$ .

С учетом этих соотношений, были вычислены оптимальные расходы исследуемых смесей для условий проведения эксперимента ( $V_f = V_{f,0}(1 + \theta)$  в интервале концентраций примесей от 0 до 26%).

Результаты расчета и эксперимента представлены на Рис. 5, максимальное расхождение данных – 3%.

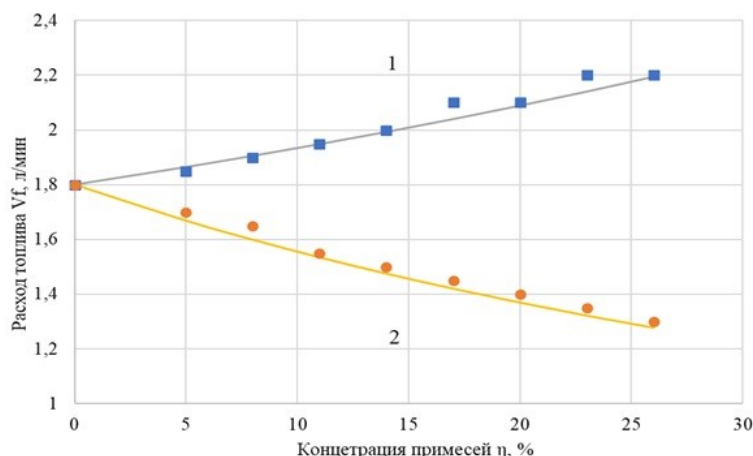


Рисунок 5 - Зависимости оптимальных расходов исследуемых смесей от концентраций примесей к метану  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.81.11>

Примечание: 1 – метан с водородом; 2 – метан с пропан-бутановым топливом; точки – экспериментальные данные, линии – теоретические данные

### Заключение

Итак, в результате проведенного исследования установлено следующее:

1. Для расходов топлива и воздуха, при которых горение метана – оптимальное, горение смеси метана с водородом или пропан-бутановым топливом становится неоптимальным. Если к метану добавляется водород, топливо сгорает полностью, но не эффективно, т.к. происходит резкое снижение разности выходной и входной температур воды. Если метан смешивается с пропан-бутановым топливом, наблюдается неполнота сгорания.

2. Получены соотношения, которые в зависимости от концентрации водорода или пропан-бутанового топлива в смеси с метаном определяют какими должен быть расход смеси и воздуха, чтобы режим горения был оптимальным с разностью выходной и входной температур воды такой же, как в случае сжигания одного метана.

3. Результаты расчетов с использованием полученных соотношений согласуются с экспериментальными значениями расходов исследуемых смесей для оптимальных режимов горения с постоянной разностью выходной и входной температур воды. Для концентраций примесей к метану от 0 до 26% максимальное расхождение результатов расчета и эксперимента составляет 3%.

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору № 075-15-2022-299 в рамках программы развития Научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

### Funding

The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement № 075-15-2022-299 within the framework of the world-class Scientific Center development program "Rational development of liquid hydrocarbon reserves of the planet".

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа / А.К. Мановян. — Москва: Химия, 2001. — 568 с.
2. Бекиров Т.М. Первичная переработка природных газов / Т.М. Бекиров. — Москва: Химия, 1987. — 256 с.
3. Gur'yanov A.I. Analysis of the Gas Turbine Engine Combustion Chamber Conversion to Associated Petroleum Gas and Oil / A.I. Gur'yanov, O.A. Evdokimov, Sh.A. Piralishvili et al. // Russian Aeronautics. — 2015. — 58. — P. 205–209. — DOI: 10.3103/S1068799815020117
4. Fonseca J. D. Trends in design of distributed energy systems using hydrogen as energy vector: A systematic literature review / J. D. Fonseca, M Camargo, J. M. Commenge [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. — 2019. — №19. — P. 9486-9504. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.177

5. Saifullin E.R. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations / E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2017. — 789. — DOI: 10.1088/1742-6596/789/1/012045
6. Saifullin E.R. Optimization of hydrocarbon fuels combustion variable composition in thermal power plants / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — 669. — DOI: 10.1088/1742-6596/669/1/012037
7. Nazarychev S.A. Combustion characteristics of mixtures of certain hydrocarbon fuels in air / S.A. Nazarychev, V. M. Larionov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — 1588. — DOI: 10.1088/1742-6596/1588/1/012038
8. Nazarychev S.A. Thermodynamic combustion analysis of methane-hydrogen and methane-propane-butane mixture in a water heating installation / S.A. Nazarychev, V.M. Larionov, A.O. Malahov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — 1923. — DOI: 10.1088/1742-6596/1923/1/012021
9. Ларионов В.М. Горение смесей углеводородных топлив в водонагревательных установках / В.М. Ларионов, С.А. Назарычев, А.О. Малахов [и др.] // *Инженерный вестник Дона*. — 2020. — №1(61). — С. 32.
10. Larionov V.M. The influence of hydrogen concentration on the flame temperature of a mixture of methane-hydrogen fuel with air / V.M. Larionov, E.R. Saifullin, N.V. Konstantinov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — 1328. — DOI: 10.1088/1742-6596/1328/1/012048

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Manovjan A.K. Tehnologija pervichnoj pererabotki nefi i prirodno go gaza [Technology of primary processing of oil and natural gas] / A.K. Manovjan. — Moscow: Himija, 2001. — 568 p. [in Russian]
2. Bekirov T.M. Pervichnaja pererabotka prirodnyh gazov [Primary processing of natural gases] / T.M. Bekirov. — Moscow: Himija, 1987. — 256 p. [in Russian]
3. Gur'yanov A.I. Analysis of the Gas Turbine Engine Combustion Chamber Conversion to Associated Petroleum Gas and Oil / A.I. Gur'yanov, O.A. Evdokimov, Sh.A. Piralishvili et al. // *Russian Aeronautics*. — 2015. — 58. — P. 205–209. — DOI: 10.3103/S1068799815020117
4. Fonseca J. D. Trends in design of distributed energy systems using hydrogen as energy vector: A systematic literature review / J. D. Fonseca, M Camargo, J. M. Commenge [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2019. — №19. — P. 9486-9504. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.177
5. Saifullin E.R. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations / E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2017. — 789. — DOI: 10.1088/1742-6596/789/1/012045
6. Saifullin E.R. Optimization of hydrocarbon fuels combustion variable composition in thermal power plants / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2016. — 669. — DOI: 10.1088/1742-6596/669/1/012037
7. Nazarychev S.A. Combustion characteristics of mixtures of certain hydrocarbon fuels in air / S.A. Nazarychev, V. M. Larionov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — 1588. — DOI: 10.1088/1742-6596/1588/1/012038
8. Nazarychev S.A. Thermodynamic combustion analysis of methane-hydrogen and methane-propane-butane mixture in a water heating installation / S.A. Nazarychev, V.M. Larionov, A.O. Malahov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — 1923. — DOI: 10.1088/1742-6596/1923/1/012021
9. Larionov V.M. Gorenje smesej uglevodorodnyh topliv v vodonagrevatel'nyh ustanovkah [Combustion of hydrocarbon fuel mixtures in water heating installations] / V.M. Larionov, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov [et al.] // *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. — 2020. — №1(61). — P. 32. [in Russian]
10. Larionov V.M. The influence of hydrogen concentration on the flame temperature of a mixture of methane-hydrogen fuel with air / V.M. Larionov, E.R. Saifullin, N.V. Konstantinov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — 1328. — DOI: 10.1088/1742-6596/1328/1/012048