

УДК 621.438.081.12

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.08

Ю.Ю. Фролов, В.А. Медведев, М.Ю. Храмцов, Р.В. Бульбович

Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АЛ-31СТ

Рассматривается возможность перехода существующей газотурбинной установки АЛ-31СТ с метана на водородное топливо. Производится расчет и сравнение основных термодинамических параметров газотурбинной установки на различных видах топлива. Термодинамические характеристики установки на водороде рассчитываются при сохранении температуры газа на входе в турбину высокого давления. Использование водорода в виде топлива позволит увеличить коэффициент полезного действия установки, а также уменьшить расход топлива. Замена метана на водород позволяет получить нулевые выбросы углеродсодержащих веществ.

Ключевые слова: газотурбинная установка, водород, метан, термодинамические параметры, мощность, коэффициент полезного действия, степень понижения полного давления, коэффициент избытка воздуха, расход топлива, эмиссия.

Yu.Yu. Frolov, V.A. Medvedev, M.Yu. Khrantsov, R.V. Bulbovich

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HYDROGEN FUEL ON THE THERMODYNAMIC PARAMETERS OF AL-31ST

The paper considers the possibility of switching the existing AL-31ST gas turbine unit from methane to hydrogen fuel. The calculation and comparison of the main thermodynamic parameters of a gas turbine installation on various types of fuel is carried out. The thermodynamic characteristics of the hydrogen plant are calculated while maintaining the gas temperature at the inlet to the high-pressure turbine. The use of hydrogen in the form of fuel will increase the efficiency of the installation, as well as reduce fuel consumption. Replacing methane with hydrogen allows you to get zero emissions of carbon-containing substances.

Keywords: gas turbine plant, hydrogen, methane, thermodynamic parameters, power, efficiency, degree of reduction of total pressure, excess air coefficient, fuel consumption, emission.

В настоящее время центральным вопросом международной энергетической повестки стало влияние на климат парникового эффекта. Парижским соглашением от 2015 г. приняты общемировые цели по обеспечению нулевых выбросов парниковых газов к 2050–60-м гг. При этом влияние энергетической отрасли на климатические процессы является определяющим. Более того, проблемы климатических и, в целом, экологических последствий энергетических преобразований становятся ограничивающими факторами устойчивого развития мировой экономики. Решение этой проблемы возможно путем трансформации энергетической отрасли с повышением степени ее глобализации и переходом на новые технологии.

Использование водородного топлива в газотурбинных установках является одним из решений минимизации вредных выбросов. Paolo Chiesa и соавторы утверждают, что по сравнению с природным газом и метаном сжигание водорода имеет ряд преимуществ и приводит к более низкому массовому расходу и другому составу газов-продуктов с более высоким содержанием воды, что, в свою очередь, влияет на молекулярную массу и удельную теплоемкость смеси [1].

Переход на водородный тип топлива требует подготовки, как установки в целом, так и инфраструктуры, добычи, переработки, транспортировки водорода. Данная работа является первоначальным шагом исследования водородного топлива и позволяет получить термодинамические параметры газотурбинной установки (ГТУ) высокой мощности на водородном топливе, а также сравнить полученные результаты с ГТУ на метане.

Анализ литературы

Газовые турбины на метане могут быть модернизированы для сжигания водорода. При 30 % доле водорода необходимые изменения в турбине незначительны и касаются вспомогательных систем. При использовании до 60 % водорода требуется перепроектирование систем пожаробезопасности, а также вентиляции корпуса, замена горелок, газовых клапанов и трубопроводов.

Современные газовые турбины выбрасывают порядка 500 г CO₂/кВт·ч в простом цикле и 250 г CO₂/кВт·ч в комбинированном. Использование водорода в сочетании с природным газом снижает эти показатели до 250 г CO₂/кВт·ч, т.е. в два раза. Японская компания Kawasaki Heavy Industries совместно с группой японских и австралийских компаний при государственной поддержке реализует пилотный проект, построенный на транснациональной технологической водородной цепочке энергетического трансфера без выбросов парниковых газов.

Другим примером пилотного проекта водородной трансформации выступает проект компании Braskem, крупнейшей нефтехимической компании в Латинской Америке, которая модернизирует когенерационную электростанцию на своем объекте в Сан-Паулу, Бразилия. Совместно с компанией Siemens создается энергокомплекс, обеспечивающий паровой и электрической энергией установку крекинга по производству этилена и сырья для химической и пластмассовой промышленности. В состав комплекса входит газовая турбина Siemens SGT-600 мощностью 24 МВт, работающая на технологическом газе с долей водорода до 60 %. Снижение выбросов CO₂ относительно традиционной энергетической схемы составит 6,3 %.

Собственные разработки по созданию первой в России газотурбинной установки на метано-водородном топливе ведет компания АО «Силовые машины». Испытания опытного образца такой турбины типа ГТЭ-65В планируется завершить до конца 2024 г.

Методика для расчета водородного топлива на базе конвертированного авиационного двигателя НК-16СТ предложена А.В. Баклановым. Данный анализ результатов, выполненный по методике Бакланова, позволяет выработать рекомендации по оптимизации конструкции топливopодводящей аппаратуры и топливных форсунок в части изменения объема внутренних каналов [2].

Одна из главных проблем, стоявших перед газовыми турбинами, сжигающими водород вместо отработанной технологии сжигания природного газа, состоит в высокой скорости водородного пламени. Это делает его более компактным и приближенным к наконечнику горелки, что приводит к перегреву наконечника. Более того, за счет больших скоростей горения пламя может проскакивать в обратном направлении, разрушая горелку [3].

При горении водорода образуется перетяжка пламени. Данную проблему описывают с помощью экспериментальной установки для исследования микроструи. Обнаружено, что пространственный размер области перетяжки пламени с ростом расхода водорода сначала резко уменьшается, а затем постепенно увеличивается одновременно с изменением формы области перетяжки пламени, пока горение в данной области не прекращается [4, 5]. Характеристики «перетяжки» сильно зависели от скорости истечения струи, частоты и интенсивности звука [6]. Вероятным решением данной проблемы при сверхзвуковом истечении является перенос вдаль воспламенителя от среза сопла [7]. Влияние добавок инертных (He, N₂, Ar, CO₂) и реагирующих (CH₄, O₂, CF₃Br, (CH₃O)₃PO) газов в поток водорода или в окружающий воздух на условия отрыва диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла приводит к уменьшению диапазона скорости микроструи, при которой возможна стабилизация пламени, вне зависимости от того, являются вводимые в водород газы инертными или реагирующими [8].

Проблема гомогенного горения – срыв пламени. Исследование этого явления представляется важнейшим направлением для изучения. Так, в работе Э.П. Волчкова и др. проводилось экспериментальное исследование проводилось в дозвуковой аэродинамической трубе с сечением канала на входе в рабочую часть 105×105 мм [9]. Вдув, при котором происходит погасание, обратно пропорционален концентрации водорода. Исследование механизма погасания пламени, при кото-

ром фронт приближается к стенке, показывает, что при увеличении скорости набегающего потока зона горения смещается вниз по потоку линейно в ламинарном режиме течения.

В работе Yanfei Li и соавторы проводят эксперимент по горению предварительно смешанной смеси «метан – водород – воздух» на основе экспериментальной сферической камеры сгорания [10]. По мере увеличения содержания водорода турбулентность и ячеистые структуры фронта пламени увеличиваются, а масштаб уменьшается. Длина Маркштейна уменьшается, и стабильность пламени снижается из-за добавления водорода. Для условий разбавленного водорода скорость растяжения пламени линейно увеличивается с добавлением водорода. В богатых водородом условиях скорость растяжения пламени увеличивается экспоненциально с добавлением водорода. Пиковое давление сгорания в турбулентной среде немного выше (менее 0,5 бар), чем в ламинарной. Турбулентность увеличивает скорость горения, и пик давления для сгорания достигается значительно раньше. Однако с добавлением водорода разница между временем достижения максимального давления сгорания в ламинарной и турбулентной средах постепенно уменьшается [11].

Исследование устойчивости горения водорода является актуальным направлением на данный момент. Ведущим механизмом, определяющим режим и пределы горения в сильно турбулентных смесях, является растяжение локального фронта пламени [12]. Концентрационные пределы распространения пламени по исходной горючей смеси «водород – воздух» соответствуют составу: нижний концентрационный предел – 9 % H_2 ; верхний – 77 % H_2 . По наиболее представительным экспериментальным данным концентрационные пределы имеют значения: нижний 4, верхний 75 % [13].

Расчет термодинамических параметров АЛ-31СТ при работе на метане

В работе производится расчет и анализ изменения термодинамических параметров ГТУ АЛ-31СТ, спроектированной для работы на метане (природном газе), при её переводе на водород [14]. Расчет проводится по термодинамической модели трехвальной ГТУ. Исходные данные для расчета термодинамических параметров ГТУ на метане представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета ГТУ при работе на метане

№	Параметр	Обозначение	Величина
1	Мощность на валу силовой турбины, МВт	N_e	16
2	Температура газа перед турбиной, К	$T_{\text{вх твд}}$	1298
3	Стандартная температура, К	T_0	288,16
4	Стандартное давление, Па	P_0	101325
5	Полнота сгорания в камере (КПД КС)	$\eta_{\text{кс}}$	0,99
6	Адиабатический КПД КНД	$\eta_{\text{кнд}}$	0,87
7	Адиабатический КПД КВД	$\eta_{\text{квд}}$	0,87
8	Адиабатический КПД ТВД	$\eta_{\text{твд}}$	0,87
9	Адиабатический КПД СТ	$\eta_{\text{ст}}$	0,88
10	Адиабатический КПД ТНД	$\eta_{\text{тнд}}$	0,87
11	Степень повышения полного давления в КНД	$\pi_{\text{кнд}}$	4,39
12	Степень повышения полного давления в КВД	$\pi_{\text{квд}}$	3,98
13	Общая степень повышения полного давления воздуха в компрессоре	$\pi_{\text{к сум}}$	17,5
14	Общая степень повышения полного давления воздуха в ГТД	$\pi_{\text{сум}}$	16,98
15	Коэффициент восстановления полного давления во входном устройстве	$\sigma_{\text{вх}}$	0,88

№	Параметр	Обозначение	Величина
16	Коэффициент восстановления полного давления в переходном канале между КНД и КВД	$\sigma_{\text{кнд}}$	0,91
17	Коэффициент восстановления полного давления в переходном канале между ТВД и ТНД	$\sigma_{\text{твд}}$	0,89
18	Коэффициент восстановления полного давления в стойках опоры СТ	$\sigma_{\text{ст}}$	0,76
19	Теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К)	C_{PB}	1,005
20	Показатель адиабаты воздуха	$k_{\text{в}}$	1,39
21	Теплоемкость газа на турбине, кДж/(кг·К)	$C_{P_{\Gamma}}$	1,13
22	Показатель адиабаты газа на турбине	k_{Γ}	1,34
23	Низшая теплотворная способность топлива, Дж/кг	$H_{\text{и}}$	11 958
24	Стехиометрическое соотношение	K_{m0}	17,21

Примечание: КС – камера сгорания, КНД – компрессор низкого давления, КВД – компрессор высокого давления, ТВД – турбина высокого давления, СТ – силовая турбина, ТНД – турбина низкого давления.

Результаты расчета термодинамических параметров ГТУ при работе на метане представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета параметров ГТУ при работе на метане

№	Параметр	Обозначение	Величина
1	Мощность на валу силовой турбины, МВт	N_e	16
2	Эффективный КПД ГТУ, %	$\eta_{\text{эфф}}$	0,34
3	Расход топлива в КС, кг/ч	G_{Γ}	3312
4	Температура газа перед турбиной, К	$T_{\text{СА}}$	1298
5	Приведенный расход воздуха на входе в двигатель, кг/с	$G_{\text{в0}}$	66,71
Компрессор низкого давления			
6	Степень сжатия КНД	$\pi_{\text{кнд}}$	4,39
7	Температура воздуха на входе в КНД, К	$T_{\text{вк}}$	288,16
8	Удельная работа КНД, КНД, кДж/кг	$N_{\text{уд}}$	175,7
Компрессор высокого давления			
9	Привед. расход воздуха на входе в КВД, кг/с	$G_{\text{квд о}}$	36,72
10	Степень сжатия КВД	$\pi_{\text{квд}}$	3,98
11	Температура воздуха перед КВД, К	$T_{\text{квд}}$	717
12	Удельная работа КВД, кДж/кг	$N_{\text{уд КВД}}$	261,28
Камера сгорания			
13	Расход воздуха в КС, кг/с	$G_{\text{вкс}}$	46,22
14	Расход топлива в КС, кг/ч	G_{Γ}	3312
15	Температура газа на выходе из КС, К	T_{Γ}	1440
16	Коэффициент избытка воздуха в КС	$\alpha_{\text{кс}}$	3,01
Турбина высокого давления			
18	Температура газа в горле 1СА ТВД, К	$T_{\text{вк твд}}$	1298
19	Степень расширения ТВД	$\pi_{\text{твд}}$	2,75
20	Удельная работа ТВД, ТВД, кДж/кг	$N_{\text{уд}}$	321,43
Турбина низкого давления			
21	Температура газа перед ТНД, К	$T_{\text{твд см}}$	1070
22	Степень расширения ТНД,	$\pi_{\text{тнд}}$	2,03
23	Удельная работа ТНД, кДж/кг	$N_{\text{уд ТНД}}$	187,4

Окончание табл. 2

№	Параметр	Обозначение	Величина
Силовая турбина			
24	Температура газа перед СТ, К	$T_{СТ}$	763
25	Степень расширения СТ	$\pi_{СТ}$	3,04
26	Удельная работа ТНД, кДж/кг	$N_{уд СТ}$	240,4

Расчет термодинамических параметров АЛ-31СТ при работе на водороде

Расчет термодинамических параметров АЛ-31СТ при работе на водороде проводится с сохранением исходного варианта блока компрессора со всеми параметрами КНД и КВД ($T_{вх}$, $\pi_{кнд}$, $N_{уд кнд}$, $G_{в0}$, $T_{квд}$, $\pi_{квд}$, $N_{уд квд}$), а также сохранением температуры газа на входе в турбину $T_{вх твд}$, так как конструктивная схема и конструкционные материалы блока турбины не подвергаются изменениям.

В табл. 3 отражены исходные данные, необходимые для расчета режимных параметров АЛ-31СТ при работе на водороде по термодинамической модели трехвальной ГТУ, которые соответствуют данным расчета на метане, за исключением параметров топлива.

Таблица 3

Исходные данные для расчета ГТУ при работе на водороде

№	Параметр	Обозначение	Величина
1	Температура газа перед турбиной, К	$T_{вх твд}$	1298
2	Приведенный расход воздуха на входе в двигатель, кг/с	$G_{в0}$	66,71
3	Стандартная температура, К	T_0	288,16
4	Стандартное давление, Па	P_0	101 325
5	Полнота сгорания в камере (КПД КС)	$\eta_{кс}$	0,99
6	Адиабатический КПД КНД	$\eta_{кнд}$	0,87
7	Адиабатический КПД КВД	$\eta_{квд}$	0,87
8	Адиабатический КПД ТВД	$\eta_{твд}$	0,87
9	Адиабатический КПД СТ	$\eta_{ст}$	0,88
10	Адиабатический КПД ТНД	$\eta_{гнд}$	0,87
11	Степень повышения полного давления в КНД	$\pi_{кнд}$	4,39
12	Степень повышения полного давления в КВД	$\pi_{квд}$	3,98
13	Общая степень повышения полного давления воздуха в компрессоре	$\pi_{к сум}$	17,5
14	Общая степень повышения полного давления воздуха в ГТД	$\pi_{сум}$	16,98
15	Коэффициент восстановления полного давления во входном устройстве	$\sigma_{вх}$	0,88
16	Коэффициент восстановления полного давления в переходном канале между КНД и КВД	$\sigma_{кнд}$	0,91
17	Коэффициент восстановления полного давления в переходном канале между ТВД и ТНД	$\sigma_{твд}$	0,89
18	Коэффициент восстановления полного давления в стойках опоры СТ	$\sigma_{ст}$	0,76
19	Теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К)	$C_{рв}$	1,005
20	Показатель адиабаты воздуха	$k_{в}$	1,39
21	Теплоемкость газа на турбине, кДж/(кг·К)	$C_{рг}$	1,16
22	Показатель адиабаты газа на турбине	$k_{г}$	1,34
23	Низшая теплотворная способность топлива, Дж/кг	H_u	28 669
24	Стехиометрическое соотношение	K_{m_0}	34,29

Результаты расчета термодинамических параметров при работе АЛ-31СТ на метане и водороде сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета параметров ГТУ при работе на метане и водороде

№	Параметр	Обозначение	Величина	
			метан	водород
1	Топливо		метан	водород
2	Мощность на валу силовой турбины, МВт	N_e	16	16,94
3	Эффективный КПД ГТУ, %	$\eta_{эфф}$	0,34	0,35
4	Расход топлива в КС, кг/ч	G_T	3312	1417,5
5	Температура газа перед турбиной, К	$T_{вх\ ТВД}$	1298	
6	Приведенный расход воздуха на входе в двигатель, кг/с	$G_{в0}$	66,71	
7	Расход газов на выхлопе, кг/с	$G_{T\ выхл}$	71,35	70,67
8	Температура газов на выхлопе	$T_{T\ выхл}$	701	696
Компрессор низкого давления				
9	Степень сжатия КНД	$\pi_{КНД}$	4,39	
10	Температура воздуха на входе в КНД, К	$T_{вх}$	288,16	
11	Удельная работа КНД, кДж/кг	$N_{уд\ КНД}$	175,7	
Компрессор высокого давления				
13	Приведенный расход воздуха на входе в КВД, кг/с	$G_{КВД\ о}$	36,72	
14	Степень сжатия КВД	$\pi_{КВД}$	3,98	
15	Температура воздуха перед КВД, К	$T_{КВД}$	717	
16	Удельная работа КВД, кДж/кг	$N_{уд\ КВД}$	261,28	
Камера сгорания				
17	Расход воздуха в КС, кг/с	$G_{вКС}$	46,224	
18	Расход топлива в КС, кг/ч	G_T	3312	1417,5
19	Температура газа на выходе из КС, К	T_T	1440	1438
20	Коэффициент избытка воздуха в КС	$\alpha_{КС}$	3,01	3,52
Турбина высокого давления				
21	Температура газа в горле 1СА ТВД, К	$T_{са}$	1298	1298
22	Степень расширения ТВД	$\pi_{ТВД}$	2,74	2,62
23	Удельная работа ТВД, кДж/кг	$N_{уд\ ТВД}$	321,43	325,16
Турбина низкого давления				
24	Температура газа перед ТНД, К	$T_{ТВД\ см}$	1070	1078
25	Степень расширения ТНД	$\pi_{ТНД}$	2,03	2,01
26	Удельная работа ТНД, кДж/кг	$N_{уд\ ТНД}$	187,40	189,29
Силовая турбина				
27	Температура газа перед СТ, К	$T_{СТ}$	763	770
28	Степень расширения СТ	$\pi_{СТ}$	3,04	3,2
29	Удельная работа ТНД, кДж/кг	$N_{уд\ СТ}$	240,4	257,45

Результаты

Выполнено сравнительное расчетное исследование изменения основных параметров ГТУ при работе метане и водороде, с сохранением исходных параметров КНД и КВД и температуры газа на входе в ТВД.

Зайченко утверждает, что использование чистого водорода в качестве топлива газового двигателя приводит к снижению его КПД на ~ 30 % по сравнению с получаемыми на природном газе [15, 16]. Как видно из табл. 4, при переходе на чистый водород мощность ГТУ увеличивается примерно на 1 МВт (+ 6,1 %), а эффективный КПД – на 3,4 % (отн.).

Теплотворная способность на единицу массы водорода более чем в два раза превосходит по этому параметру метан, что делает водород самым экономичным видом топлива с точки зрения массового расхода топлива. Результатом этого является пропорционально меньший массовый расход топлива в камере сгорания ГТУ.

Также, ввиду того что расход топлива значительно снизился, а стехиометрический коэффициент у водорода выше, чем у метана, коэффициент избытка воздуха в камере сгорания при использовании водорода выше, чем при использовании метана.

Вследствие улучшения работоспособности рабочего тела снижаются требуемые степени понижения полного давления (расширения) ТВД и ТНД на 4,4 и 0,8 % соответственно.

Как видно из таблицы, суммарная степень повышения полного давления в компрессоре остается постоянной при всех вариантах расчета, поэтому располагаемая суммарная степень понижения полного давления (расширения) всех турбин не изменяется, вследствие чего степень понижения полного давления СТ повышается на 5,3 %.

Выводы

Работа на топливе с высоким содержанием водорода, кроме описанных выше чисто термодинамических изменений, требует решения ряда технологических и конструктивных проблем, затрагивающих различные системы и узлы двигателя, среди которых:

– Самовоспламенение. Высокая реакционная способность водорода увеличивает риск самовоспламенения в отсеке предварительного смешения. Хотя при увеличении концентрации водорода в углеводородистых топливах $T_0 < 1050$ К, водорода является ингибитором самовоспламенения [17]. Данная проблема может возникать в системах с большой температурой воздуха на входе, в ГТУ с высоким КПД.

– Проскок пламени. Сжигание богатого водородом топлива увеличивает риск проскока пламени из-за более высокой скорости пламени или более короткого времени задержки воспламенения по сравнению с метаном.

– Термоакустика. По сравнению с пламенем метана водородное пламя демонстрирует совершенно иное термоакустическое поведение. Это связано также с более высокой скоростью пламени, более коротким временем задержки воспламенения и различными механизмами стабилизации пламени, что приводит к различным формам факела, его положению и различной реактивной способности. Поэтому, риск пульсаций (автоколебаний горения на акустической частоте КС или вблизи нее), как ожидается, возрастет по сравнению с работой на метане. Также это означает, что такие опасные явления, как нестабильность горения, проскок и бедный срыв, могут произойти не только на установившихся режимах, но и во время переходных, например, когда требуется быстрое изменение мощности.

– Эмиссия NO_x . Более высокая адиабатическая температура водородного пламени приводит к более высоким выбросам NO_x . Но если снижать температуру для уменьшения выбросов, это негативно скажется на мощности и КПД ГТУ.

– Изменения числа Воббе. По сравнению со сжиганием метана при той же тепловой мощности при сжигании водорода необходим больший объемный расход топлива из-за его меньшей объемной теплотворной способности. Кроме того, водород имеет более низкое число Воббе, которое является наиболее часто используемым параметром определения приемлемости газообразного топлива в системе горения. Значение числа Воббе заключается в том, что при заданных условиях подачи топлива и условиях в камере сгорания (температура и давления) и заданном положении регулирующего клапана два газа с различным составом, но одинаковым числом Воббе будут давать одинаковую энергию, поступающую в систему сгорания. А чем больше изменение числа Воббе, тем больше требуется гибкость систем горения и связанных с ними систем управления.

– Уменьшение ресурса. Сжигание водорода вместо метана приведет к увеличению содержания влаги в продуктах сгорания, что может привести к перегреву горячего газовойоздушного тракта ГТУ, а также горячей коррозии.

– Проблема водородного охрупчивания трубопроводов и вспомогательных систем, применяемых для природного газа.

– Продувка. Чем больше задействовано компонентов, тем выше вероятность того, что некоторое количество водорода останется задержанным внутри топливной системы, что приведет к риску взрыва при выполнении технического обслуживания или ремонта.

Результаты термодинамического анализа показали, что в ГТУ, спроектированной для работы на метане (природном газе), происходит перераспределение степеней понижения полного давления между турбинами, а также уменьшается потребная пропускная способность всех турбин относительно двигателя, спроектированного для работы на метане, что приводит к небольшой синхронной «раскрутке» роторов высокого и низкого давления.

Библиографический список

1. Chiesa P., Lozza G., Mazzocchi L. Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of The Asme*. – 2005. – Vol. 127. – P. 73–80. DOI: 10.1115/1.1787513
2. Бакланов А.В. Возможность использования метано-водородного топлива в конвертированных газотурбинных двигателях для энергетических установок // *Сибирский аэрокосмический журнал*. – 2021. – Т. 22, № 1. – С. 82–93.
3. Глобальное энергетическое объединение: новые возможности водородных технологий / А.Г. Филимонов, А.А. Филимонова, Н.Д. Чичирова, А.А. Чичиров // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 3–13.
4. Диффузионное горение круглой микроструи водорода при до- и сверхзвуковой скорости истечения из сопла / В.В. Козлов, Г.Р. Грек, Ю.А. Литвиненко, А.Г. Шмаков, В.В. Вихорев // *Сибирский физический журнал*. – 2018. – Т. 13, № 2. – С. 37–52.
5. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Часть 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение / А.Г. Шмаков, Г.Р. Грек, В.В. Козлов, Г.В. Козлов, Ю.А. Литвиненко // *Сибирский физический журнал*. – 2017. – Т. 12, № 2. – С. 28–45.
6. Особенности горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях / В.В. Козлов, Г.Р. Грек, О.П. Коробейничев, Ю.А. Литвиненко, А.Г. Шмаков // *Вестник Новосибирск. гос. ун-та. Серия: Физика*. – 2014. – Т. 9, вып. 1. – С. 79–86.
7. Явление запираания микросопла при диффузионном горении водорода / В.В. Козлов, А.Г. Шмаков, Г.Р. Грек, Г.В. Козлов, Ю.А. Литвиненко // *Доклады Академии наук*. – 2018. – Т. 480, № 1. – С. 34–39.
8. Изучение пределов устойчивого горения диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла, при введении в водород или воздух инертных и реагирующих газов / А.Г. Шмаков, В.В. Козлов, М.В. Литвиненко, Ю.А. Литвиненко // *Сибирский физический журнал*. – 2019. – Т. 14, № 3. – С. 64–75.
9. Волчков Э.П., Лукашов В.В. Экспериментальное исследование характеристик ламинарного пограничного слоя при горении в нём водорода // *Физика горения и взрыва*. – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 3–10.
10. Li Y., Zhang X., Wang Y. Experimental study on the combustion characteristics of premixed methane-hydrogen-air mixtures in a spherical closed chamber // *Fuel*. – 2021. – Vol. 299. – P. 20885–20895.
11. Combustion enhancement and inhibition of hydrogen-doped methane flame by HFC-227ea / X. Zhang [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – Vol. 46, iss. 41. – P. 21704–21714.
12. Численное моделирование режимов турбулентного горения водорода вблизи бедного предела / А.С. Бетева, А.Д. Киверин, С.П. Медведев, И.С. Яковенко // *Химическая физика*. – 2020. – Т. 39, №12. – С. 17–23.
13. Горев А. О концентрационных пределах распространения пламени в системе водород-воздух // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2011. – Т. 20, №12. – С. 23–26.
14. Комаров О.В., Блинов В.Л., Шемякин А.С. Тепловые и газодинамические расчеты газотурбинных установок: учеб.-метод. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 164 с.
15. Горение обедненных смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием / В.М. Зайченко, А.Д. Киверин, А.Е. Смыгина, А.И. Цыплаков // *Известия Академии наук. Энергетика*. – 2018. – № 4. – С. 87–99.

16. Fordoei E., Mazaheri K., Mohammadpour A. Effects of hydrogen addition to methane on the thermal and ignition delay characteristics of fuel-air, oxygen-enriched and oxy-fuel MILD combustion // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – Vol. 46. – P. 34002–34017.

17. Самовоспламенение и горение тройных гомогенных и гетерогенных смесей «углеводород – водород – воздух» / С.М. Фролов, С.Н. Медведев, В.Я. Басевич, Ф.С. Фролов // *Химическая физика*. – 2013. – Т. 32, № 8. – С. 43–48.

References

1. Chiesa P., Lozza G., Mazzocchi L. Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of The Asme – J ENG GAS TURB POWER-T ASME* (2005), Vol.127, pp. 73-80. DOI:10.1115/1.1787513.

2. Baklanov A.V. *Vozmozhnost ispolzovaniya metano-vodorodnogo topliva v konvertirovannykh gazoturbinnnykh dvigatelyakh dlya energeticheskikh ustanovok* [The possibility of using methane-hydrogen fuel in converted gas turbine engines for power plants]. *Siberian Aerospace Journal*, 2021, Vol. 22, No. 1, pp. 82-93.

3. Filimonov A.G., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Chichirov A.A. *Globalnoye energeticheskoye obyedineniye: novyye vozmozhnosti vodorodnykh tekhnologiy* [Global Energy Association: new possibilities of hydrogen technologies]. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2021, Vol. 23, No. 2, pp. 3-13.

4. Kozlov V.V., Grek G.R., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G., Vikhorev V.V. *Diffuzionnoye goreniye krugloy mikrostrui vodoroda pri do- i sverkhzvukovoy skorosti istecheniya iz sopla* [Diffusion combustion of a circular microjet of hydrogen at pre- and supersonic velocity of discharge from the nozzle]. *Siberian Physical Journal*, 2018, Vol.13, No. 2, pp. 37-52.

5. Shmakov A.G., Grek G.R., Kozlov V.V., Kozlov G.V., Litvinenko Yu.A. *Eksperimental'noye issledovaniye diffuzionnogo goreniya vysokoskorostnoy krugloy mikrostrui vodoroda. Chast 1. Prisoyedinennoye plamya, dozvukovoye techeniye* [Experimental study of diffusion gorenje high-speed circular microjet hydrogen. Part 1. Attached flame, subsonic flow]. *Siberian Physical Journal*, 2017, Vol. 12, No. 2, pp. 28-45.

6. Kozlov V.V., Grek G.R., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. *Osobennosti goreniya vodoroda v krugloy i ploskoy mikrostruye v poperechnom akusticheskom pole i ikh sravneniye s rezultatami goreniya propana v tekhnicheskikh usloviyakh* [Features of hydrogen combustion in a round and flat microjet in a transverse acoustic gorenje the field and their comparison with the results of gorenje propane under the same conditions]. *Siberian Physical Journal*, 2014, Vol. 9, is. 1, pp. 79-86.

7. Kozlov V.V., Shmakov A.G., Grek G.R., Kozlov G.V., Litvinenko Yu.A. *Yavleniye zapiraniya mikrosopla pri diffuzionnom goreni vodoroda* [The phenomenon of microsoplasmic locking during diffusive gorenje hydrogen]. *DOKLADY AKADEMII NAUK*, 2018, Vol. 480, No. 1, pp. 34-39.

8. Shmakov A.G., Kozlov V.V., Litvinenko M.V., Litvinenko Yu.A. *Izucheniye predelov ustoychivogo goreniya diffuzionnogo plameni mikrostrui vodoroda, istekayushchey iz kruglogo mikrosopla, pri vvedenii v vodorod ili vozdukh inertnykh i reagiruyushchikh gazov* [Study of the limits of stable combustion of a diffusion flame of a hydrogen microjet flowing from a round microsoplane when inert and reacting gases are introduced into hydrogen or air]. *Siberian Physical Journal*, 2019, Vol. 14, No. 3, pp. 64-75.

9. Volchkov E.P., Lukashov V.V. *Eksperimentalnoye issledovaniye kharakteristik laminarnogo pogrannichnogo sloya pri goreni v nem vodoroda* [Experimental investigation of the characteristics of a laminar boundary layer during the combustion of hydrogen in it]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2012, Vol. 48, No. 4, pp. 3-10.

10. Li Y., Zhang X., Wang Y. *Experimental study on the combustion characteristics of premixed methane-hydrogen-air mixtures in a spherical closed chamber* // *Fuel*, 2021, Volume 299, pp. 20885-20895.

11. Zhang X., Yang Z., Zuang X., Wang X., Pan Y., Zhou X., *Combustion enhancement and inhibition of hydrogen-doped methane flame by HFC-227ea* // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, Volume 46, Issue 41, pp. 21704-21714.

12. Beteva A.S., Kiverin A.D., Medvedev S.P., Yakovenko I.S. *Chislennoye modelirovaniye rezhimov turbulentnogo goreniya vodoroda vblizi bednogo predela* [Numerical modeling of turbulent hydrogen combustion regimes near the poor limit]. *Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*, 2020, vol.39, No. 12, p.17-23.

13. Gorev A. *O kontsentratsionnykh predelakh rasprostraneniya plameni v sisteme vodorod-vozdukh* [On the concentration limits of flame propagation in the hydrogen-air system]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2011, vol.20, No. 12, pp. 23-26.

14. O.V. Komarov, V.L. Blinov, A.S. Shemyakinsky. *Teplovyye i gazodinamicheskiye raschety gazoturbinnnykh ustanovok: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Thermal and gas-dynamic calculations of gas turbine installations: an educational and methodical manual]. *Yekaterinburg: Ural University Press*, 2018, 164 p.

15. Zaichenko V.M., Kiverin A.D., Smygalina A.E., Tsyplakov A.I. Gorenije obednennykh smesey na osnove vodoroda v dvigatele s iskrovym zazhiganiyem [Combustion of hydrogen-based lean mixtures in a spark ignition engine]. *Thermal Engineering*, 2018, No. 4, pp. 87-99.

16. Fordoei E., Mazaheri K., Mohammadpour A. Effects of hydrogen addition to methane on the thermal and ignition delay characteristics of fuel-air, oxygen-enriched and oxy-fuel MILD combustion // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, Volume 46, Issue, pp. 34002-34017.

17. Frolov S.M., Medvedev S.N., Basevich V.Ya., Frolov F.S. Samovosplamneniye i gorenije troynykh gomogennykh i geterogennykh smesey uglevodorod–vodorod–vozdukh [Spontaneous ignition and gorenje triple homogeneous and heterogeneous mixtures of hydrocarbon–hydrogen–air]. *Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*, 2013, vol.32, No. 8, pp.43-48.

Об авторах

Фролов Юрий Юрьевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: frolovyu@yandex.ru).

Медведев Виктор Анатольевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: vitek_96-04@mail.ru).

Храмцов Михаил Юрьевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: hramtsov@m@yandex.ru).

Бульбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: bulbovich@pstu.ru).

About the authors

Yurii Yu. Frolov (Perm, Russian Federation) – PhD Student, Department “Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: frolovyu@yandex.ru).

Viktor A. Medvedev (Perm, Russian Federation) – PhD Student, Department “Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: vitek_96-04@mail.ru).

Mikhail Yu. Khramtsov (Perm, Russian Federation) – Head of the Educational Laboratory, PhD student, Department “Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: hramtsov@m@yandex.ru).

Roman V. Bulbovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: bulbovich@pstu.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 15.09.2022

Одобрена: 30.09.2022

Принята к публикации: 10.11.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Исследование влияния водородного топлива на термодинамические параметры АЛ-31СТ / Ю.Ю. Фролов, В.А. Медведев, М.Ю. Храмцов, Р.В. Бульбович // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* – 2022. – № 70. – С. 87–96. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.08

Please cite this article in English as: Frolov Y.Yu., Medvedev V.A., Khramtsov M.Yu., Bulbovich R.V. Investigation of the effect of hydrogen fuel on the thermodynamic parameters of AL-31ST. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 70, pp. 87-96. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.08