

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЛИ НЕПРОРЕАГИРОВАВШЕГО ВОДОРОДА ПРИ СЖИГАНИИ В СРЕДЕ КИСЛОРОДА*

Р.З. Аминов¹, А.И. Счастливец², А.Н. Байрамов¹

¹ФГБУН Саратовский научный центр РАН, Отдел энергетических проблем СНЦ РАН
офис № 13, д. 77, ул. Политехническая, Саратов, 410054, Россия
тел.: +7(8452)56-91-95 факс: 8(8452)52-55-10; e-mail: oerpran@inbox.ru

²ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН
стр. 2, д. 13, ул. Ижорская, Москва, 125412, Россия
e-mail: h2lab@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.68-79

Заключение совета рецензентов: 14.02.20 Заключение совета экспертов: 28.02.20 Принято к публикации: 19.03.20

Использование водорода как энергоносителя в энергетике связано с возможностью повышения эффективности генерирующих мощностей, в частности АЭС, за счет перегрева рабочего тела паротурбинного цикла. При этом полученный от сжигания водорода с кислородом высокотемпературный пар смешивается с паром паротурбинного цикла АЭС. В этой связи в статье, с учетом работ других авторов, выполнен широкий круг исследований по повышению эффективности и конкурентоспособности АЭС благодаря паро-водородному перегреву рабочего тела паротурбинного цикла в условиях получения водорода электролизом воды за счет дешевой ночной электроэнергии от АЭС. При этом важную роль играют вопросы эффективного сжигания водорода с кислородом. Впервые исследуется состав получаемого пара без смешения с охлаждающим компонентом. Представлены экспериментальные данные по изучению доли непрореагировавшего водорода при его сжигании с кислородом без смешения получаемого пара с охлаждающим компонентом – паром или водой. Приведена схема экспериментальной установки, разработанной совместно с ОИВТ РАН, позволяющая производить отбор пара на химический анализ посредством хроматографа. Приведены результаты экспериментальных измерений основных параметров процесса сжигания водорода в кислороде при стехиометрическом расходе водорода и кислорода, а также при избытке кислорода, равном 2. Расчетно-теоретическим путем определена температура получаемого пара по длине жаровой трубы экспериментальной установки, в том числе в точке зажигания. За счет химического анализа пара определена доля непрореагировавшего водорода на начальном этапе горения водорода. Показано влияние избытка окислителя на начальное и конечное содержание непрореагировавшего водорода в паре. Представлена методика определения времени движения пара внутри жаровой трубы экспериментальной установки.

Ключевые слова: водород; АЭС; экспериментальная установка; недожог водорода; стехиометрическое горение; химический анализ пара; температура горения.

*Аминов Р.З., Счастливец А.И., Байрамов А.Н. Экспериментальная оценка доли непрореагировавшего водорода при сжигании в среде кислорода // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;07-18:68-79.



EXPERIMENTAL ESTIMATE OF THE UNREACTED HYDROGEN PROPORTION WHEN BURNED IN OXYGEN

R.Z. Aminov¹, A.I. Schastlivtsev², A.N. Bairamov¹

¹Federal State Budgetary Institution of Science Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
of. 13, 77 Polytechnicheskaya Str., Saratov, 410054, Russia

tel.: +7(8452)56 91 95 fax: 8(8452)52 55 10; e-mail: oerpran@inbox.ru

²ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН

13/2 Izhorskaya Str., Moscow, 125412, Russia

e-mail: h2lab@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.68-79

Referred 14 February 2020 Received in revised form 28 February 2020 Accepted 19 March 2020

The use of hydrogen as an energy carrier in the energy sector is associated with the possibility of increasing the efficiency of generating capacities, in particular nuclear power plants, through the overheating of the steam of a steam-turbine cycle. In this case, the high-temperature steam obtained from the combustion of hydrogen with oxygen is mixed with the steam of the steam turbine cycle. Taking into account the works of the other authors, this paper performs a wide range of studies to increase the efficiency and competitiveness of nuclear power plants due to steam-hydrogen overheating of the steam of the steam-turbine cycle under conditions of hydrogen production by electrolysis of water due to inexpensive night-time electricity from the NPP. An important role is played by the efficient burning of hydrogen with oxygen. In this regard, the paper for the first time studies the composition of the resulting steam without using mixing with a cooling component. The paper presents experimental data on the unreacted hydrogen proportion during its combustion with oxygen without mixing the resulting steam with a cooling component – steam or water. Moreover, the paper presents the experimental setup developed together with the United Institute for High Temperatures of RAS and allowing the selection of steam for chemical analysis by means of a chromatograph. The results of experimental measurements of the main parameters of the process of burning hydrogen in oxygen with a stoichiometric flow of hydrogen and oxygen, as well as with an excess of oxygen equal to 2, are presented. The theoretical calculation method defines the temperature of the resulting steam along the length of the flame tube of the experimental setup, including at the ignition point. Due to chemical analysis of steam, the unreacted hydrogen proportion at the initial stage of hydrogen combustion is determined. The effect of an excess of oxidizing agent on the initial and final content of unreacted hydrogen in the vapor is shown. The methodology of determining the time of steam movement inside the flame tube of the experimental setup is presented. In this regard, the paper for the first time studies the composition of the resulting steam without using mixing with a cooling component.

Keywords: hydrogen; NPP; experimental plant; hydrogen underburning; stoichiometric combustion; chemical analysis of steam; combustion temperature.



Рашид Зарифович
Аминов
Rashid Aminov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, главный научный сотрудник, ФГБУН Саратовский научный центр.

Образование: Саратовский политехнический институт (1961 г.).

Область научных интересов: энергетические системы на органическом топливе; водородная энергетика; ядерная и радиационная безопасность; радиоэкология.

Публикации: 342.

h-index: 8

ORCID: 0000-0003-1549-5133

Scopus Author ID: 7006689108

Research ID: O-3305-2014

Information about the author:
D.Sc. in Engineering, Professor, Chief Researcher at Saratov Scientific Center of RAS.

Education: Saratov Polytechnical Institute, 1961.

Research interests: energy systems on organic fuel; hydrogen energy; nuclear and radiation safety; radiation ecology.

Publications: 342.



Артём Николаевич
Байрамов
Artem Bairamov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник Саратовского научного центра РАН.

Образование: Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина (2007 г.).

Область научных интересов: водородная энергетика; проблемы создания энергетического оборудования; энерго- и ресурсосберегающие, экологически чистые химико-технологические процессы; моделирование технических систем; термодинамические процессы в технических системах; процессы тепло- и массообмена; возобновляемые источники и системы прямого преобразования энергии.

Публикации: 50.

h-index: 7; SPIN-код: 1620-2441

ORCID: 0000-0003-1573-0578

Scopus Author ID: 35224451800

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Researcher at Saratov Scientific Center of the RAS.

Education: Saratov State Technical University named Yuri Gagarin, 2007.

Research interests: hydrogen energy; problems of energy equipments building; energy resources savings, ecological clean and chemical-technological processes; modeling of technical systems; thermodynamic processes in technical systems; thermal and mass exchange processes; renewable and systems of direct transform energy.

Publications: 50.



Алексей Иванович
Счастливцев
Alexey Schastlivtsev

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН.

Образование: МГТУ им. Н.Э. Баумана (2006 г.).

Область научных интересов: водородная энергетика; водородно-кислородные парогенераторы, сжигание водорода; паротурбинные и газотурбинные установки; термодинамические циклы, возобновляемые источники энергии.

Публикации: 38.

SPIN-код: 12603444; *h*-index: 4

ORCID: 0000-0001-5895-5262

Scopus Author ID: 36773660300

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Researcher at Join institute for high temperatures of the RAS.

Education: Bauman Moscow State Technical University, 2006.

Research interests: hydrogen energy; hydrogen-oxygen steam generators; hydrogen combustion, steam and gas turbine plants; thermodynamic cycles, renewable energy sources.

Publications: 38.

1. Введение

Основным методом получения водорода была и остается технология паровой каталитической конверсии природного газа. При этом в последнее время в условиях декарбонизации мировой экономики все больше внимания уделяется учету эмиссии углекислого газа при производстве водорода различными методами, так называемый углеродный след. В этой связи метод паровой конверсии связан со значительной эмиссией CO₂, поэтому не может быть частью водородной экономики будущего, и в этом случае эффективнее использовать природный газ по своему прямому назначению [1]. Водород, полученный таким способом, называют серым. Единственной возможностью снизить углеродный след при получении водорода паровой конверсией – это использование технологии улавливания и хранения углекислого газа («голубой» водород), но данная технология пока далека от полномасштабной коммерциализации. В мире известны три проекта (США, Канада, Япония) паровой конверсии метана с частичным улавливанием, транспортом и хранением CO₂. При этом технология улавливания CO₂ увеличивает капиталовложения в технологию паровой конверсии до 87 % [1].

Альтернативой получению водорода паровой конверсией метана является метод электролиза воды, у которого углеродный след минимальный при изолированном (не от энергосистемы) потреблении

электроэнергии от возобновляемых источников, а также от АЭС (зеленый водород). Таким образом, большинство исследований по водородным программам нацелены на технологии получения зеленого водорода, который будет занимать приоритетную роль в мировой экономике будущего [1].

Вместе с тем большое внимание уделяется вопросам получения водорода с помощью ядерных энергетических технологий [2–7]. Так, например, предполагается, что термоядерный синтез, являющийся экологически безопасным процессом, станет приоритетной технологией при производстве водорода в глобальном масштабе. Кроме того, отмечается, что для устойчивого будущего лучшей энергетической системой является солнечно-водородная, и она должна заменить систему на основе ископаемого топлива до конца XXI века.

Одной из актуальных проблем является изучение процесса сжигания водорода в кислороде с целью оценки возможной доли непрореагировавшего водорода и определения условий, при которых этот недожог можно будет свести к минимуму. В данной работе впервые проведено экспериментальное определение недожога водорода без смешения получаемого пара с охлаждающим компонентом. В настоящее время процесс сжигания водорода в кислороде изучается в сотрудничестве с ОИВТ РАН, где создана и испытывается экспериментальная установка.



Список обозначений	
Буквы латинского алфавита	
g_{H_2}	Массовая доля непрореагировавшего водорода
x_{H_2}	Мольная доля непрореагировавшего водорода
l_n	Длина соответствующей секции жаровой трубы экспериментальной установки, м
$v_{пар}^{(n)}$	Скорость движения пара по секциям жаровой трубы экспериментальной установки, м/с.
n	Порядковый номер секции жаровой трубы экспериментальной установки от начала горения до выхлопа в окружающую среду (принято от 1 до 4)
$v_{пар}^{(n-1)}$	Скорость пара на выходе из предыдущей секции, м/с
$\int_{T_2}^{T_1} dv_{пар}^{(n)}$	Прирост скорости пара в n -й секции, м/с
$v_{пар}^{(0)}$	Начальная скорость пара, м/с
$G_{пар}$	Массовый расход водородного пара, кг/с
f	Площадь проходного сечения 1-й секции, м ²
$\frac{dv}{dT}$	Прирост скорости пара по приросту температуры
$\frac{dv}{dv}$	Прирост скорости пара по приросту удельного объема пара
$\frac{dv}{dT}$	Прирост удельного объема пара по приросту температуры пара
dv	Дифференциальный прирост скорости пара, м/с
dv	Дифференциальный прирост удельного объема пара, м ³ /кг
T	Температура, К
$l_{жар.тр.}$	Длина жаровой трубы
Буквы греческого алфавита	
$\tau_{пар}^{(n)}$	Время пребывания пара в каждой секции по длине жаровой трубы экспериментальной установки, с
$\tau_{пар}$	Итоговое время пребывания пара по мере движения через секции жаровой трубы, с
v	Удельный объем пара, м ³ /кг
Буквы русского алфавита	
$M_{дис.пар}$	Молекулярная масса диссоциированного пара
Аббревиатуры	
АЭС	Атомная электростанция
ОИВТ РАН	Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

2. Теоретическая часть

Использование водорода в качестве промежуточного энергоносителя в энергетике позволяет осуществлять перегрев рабочего тела электростанций с повышением их КПД и мощности посредством смешения пара, полученного от сжигания водорода в кислороде с паром начальных параметров перед турбиной. В этой связи авторами статьи с учетом работ других авторов проведены исследования [8–14] по повышению эффективности и конкурентоспособности АЭС за счет паро-водородного перегрева рабочего тела паротурбинного цикла в условиях получения водорода электролизом воды с использованием дешевой ночной электроэнергии от АЭС. Кроме того, в последнее время все чаще начинают предлагаться схемы, в которых водородосжигающие технологии используются для повышения маневренности и аккумулирования энергии на АЭС малой мощности [15, 16] и в парогазовых установках [17]. При этом свежий пар после парогенератора перегревается паром, полученным от сжига-

ния водорода в кислороде в специальном горелочном устройстве [18–20], который остается в проточной части энергоустановки.

По проблеме изучения сжигания водорода в среде кислорода выполнен ряд исследований, в том числе экспериментальных [21–28]. В этих исследованиях недожог водорода оценивался в условиях смешения полученного высокотемпературного пара с охлаждающей водой или паром с целью снижения рабочей температуры и сохранности экспериментальной установки с обеспечением надежности и безопасности экспериментального процесса. При этом работ по экспериментальному изучению горения водорода в кислороде при стехиометрическом соотношении компонентов без добавления охлаждающей воды или пара не выявлено.

3. Методика эксперимента

Особенность оценки недожога водорода при смешении получаемого высокотемпературного пара с охлаждающим агентом состоит в том, что неизбе-



жен эффект закалки. Это не позволяет в большей мере прореагировать водороду и тем самым приводит к повышенному содержанию водорода в составе получаемого пара. В настоящей статье приведены результаты оценки недожога водорода без смешения получаемого пара от сжигания водорода с охлаждающим агентом. Данная постановка эксперимента

представлена и исследована впервые и является продолжением работы [23].

Разработанная совместно с ОИВТ РАН экспериментальная установка содержит блок зажигания и жаровую трубу в виде последовательно соединенных четырех секций с внешним охлаждением каждой без смешения получаемого пара с охлаждающей водой (рис. 1).

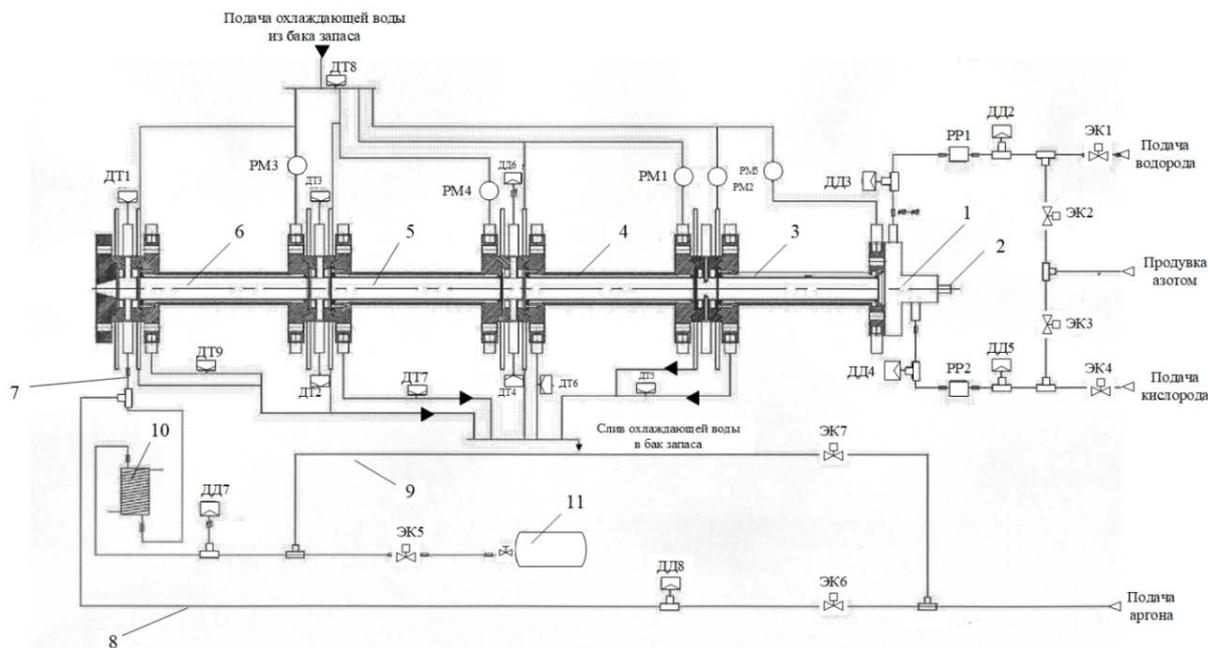


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – блок зажигания; 2 – запальная электросвеча; 3–6 – секции жаровой трубы; 7 – магистраль отбора пара на химический анализ; 8, 9 – магистрали подачи аргона; 10 – змеевиковый охладитель отборной пробы пара; 11 – приемный бак; ДТ1, ДТ2, ДТ3, ДТ4 – датчики температуры пара; ДТ5, ДТ6, ДТ7, ДТ8, ДТ9 – датчики температуры охлаждающей воды; РМ1, РМ2, РМ3, РМ4, РМ5 – датчики расхода охлаждающей воды; ДД2, ДД3 – датчики давления водорода; ДД4, ДД5 – датчики давления кислорода; ДД6 – датчик давления пара; ДД7 – датчик давления отборной пробы пара для химического анализа; ДД8 – датчик давления аргона; ЭК1–ЭК7 – электроклапаны

Fig. 1 – Scheme of the experimental setup: 1 – ignition unit; 2 – electric light; 3–6 – flame tube sections; 7 – pipeline of chemical sampling steam; 8, 9 – argon supply pipelines; 10 – coil cooler of steam sampling; 11 – receiving tank; ДТ1, ДТ2, ДТ3, ДТ4 – steam temperature sensors; ДТ5, ДТ6, ДТ7, ДТ8, ДТ9 – cooling water temperature sensors; РМ1, РМ2, РМ3, РМ4, РМ5 – cooling water flow sensors; ДД2, ДД3 – hydrogen pressure sensors; ДД4, ДД5 – oxygen pressure sensors; ДД6 – steam pressure sensor; ДД7 – pressure sensor of steam sample for chemical analysis; ДД8 – argon pressure sensor; PP1, PP2 – regulator of flow of hydrogen and oxygen, respectively; ЭК1–ЭК7 – electric valves

Общая длина всех четырех секций жаровой трубы с блоком зажигания и промежуточными вставками составляет 980 мм, внутренний диаметр – 27 мм.

Охлаждающая вода после охлаждения каждой секции уходит в сливную магистраль. Температура пара внутри жаровой трубы измеряется в 4-х местах датчиками температуры (ДТ1–ДТ4) (см. рис. 1). Температура охлаждающей воды измеряется на выходе из каждой секции, а также измеряется расход воды, водорода и кислорода. Установленные датчики давления позволяют измерять давление внутри жаровой трубы между второй и третьей секциями (ДД6) и в линии отбора пара перед электроклапаном подачи в приемный бак для отбора пара на химический анализ (ДД7).

Охлаждающая вода подается из специального бака насосом и циркулирует через контур охлаждения. Водород и кислород подаются из баллонов с давлени-

ем 15 МПа. В экспериментальной установке предусмотрены регуляторы расхода водорода и кислорода.

Отборная проба перед попаданием в приемный бак отдает тепло окружающей среде. При этом содержащийся непрореагировавший водород будет стремиться взаимодействовать с кислородом в направлении образования водяных паров, то есть рекомбинировать, что снизит первоначальное его содержание в паре в момент отбора и не позволит достоверно определить недожога. С целью не допустить рекомбинации в пробоотборнике или существенно снизить ее, следом за отбором пара в отборную трубку предусмотрена подача балластирующего газа – аргона. В этом случае для отборной пробы создается резкое охлаждение и разбавление состава смеси, сопровождаемое эффектом закалки. После этого смесь водяного пара с непрореагировавшим водородом, кислородом и аргоном поступает в приемный бак объемом 3 л. Определение

содержания водорода в смеси проводилось путем ее пропускания через хроматограф после конденсации водяных паров и их удаления из приемного бака, что связано с особенностью работы хроматографа.

Система автоматического управления и измерений позволяет:

- обеспечивать возможность автоматического и ручного управления;
- обеспечивать аварийное отключение при возникновении внештатных ситуаций;
- проводить запись измеряемых параметров с частотой до 0,1 с;

– проводить многорежимные испытания.

4. Результаты экспериментальных измерений процесса горения водорода

Проведены испытания экспериментальной установки по сжиганию водорода в среде кислорода в режиме при стехиометрическом расходе водорода и кислорода и при избытке окислителя, равном 2. На рис. 2 и рис. 3 соответственно приведены результаты измерений.

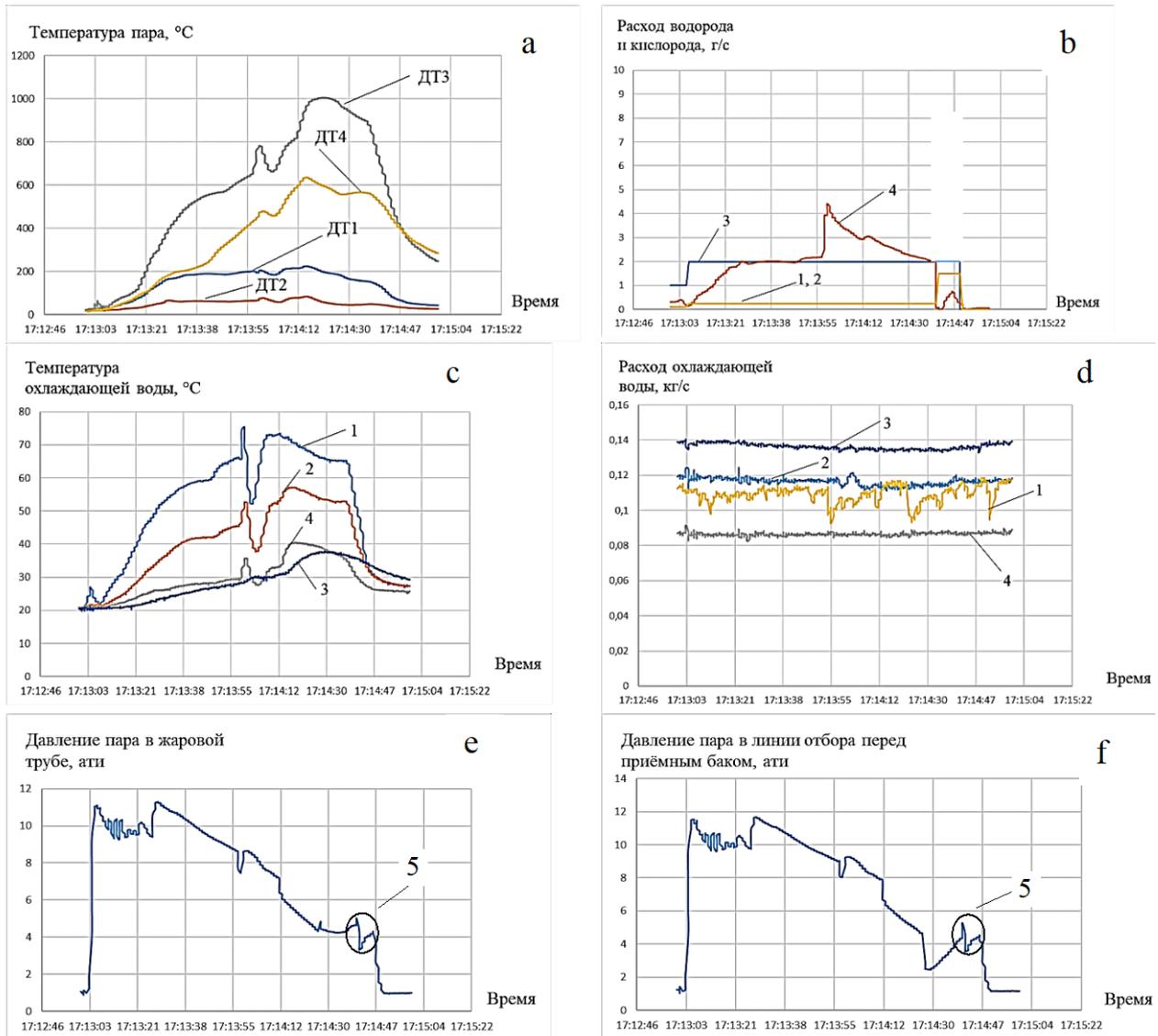


Рис. 2 – Результаты измерений в эксперименте при стехиометрическом расходе H_2 и O_2 – ДТ1 – ДТ4 – согласно рис. 1; *b* – 1, 2 – значение уставки и фактический расход водорода соответственно; 3, 4 – значение уставки и фактический расход кислорода соответственно; *c* – 1–4 – температура охлаждающей воды для 1-й, 2-й, 3-й и 4-й секций соответственно; *d* – 1–4 – расход охлаждающей воды для 1-й, 2-й, 3-й и 4-й секций соответственно; *e*, *f* – 5 – давление пара в жаровой трубе и в линии отбора пара соответственно после 1-й секции в период отбора пробы

Fig. 2 – The results of measurements in the experiment with a stoichiometric consumption of hydrogen and oxygen: *a* – ДТ1 – ДТ4 – according to fig. 1; *b* – 1, 2 – set point value and actual hydrogen consumption respectively; 3, 4 – setpoint value and actual oxygen consumption respectively; *c* – 1–4 – temperature of cooling water for the 1st, 2nd, 3rd and 4th sections respectively; *d* – 1–4 – cooling water flow for the 1st, 2nd, 3rd and 4th sections respectively; *e*, *f* – 5 – steam pressure in the flame tube and in the steam sampling line, respectively, after the 1st section during the sampling period

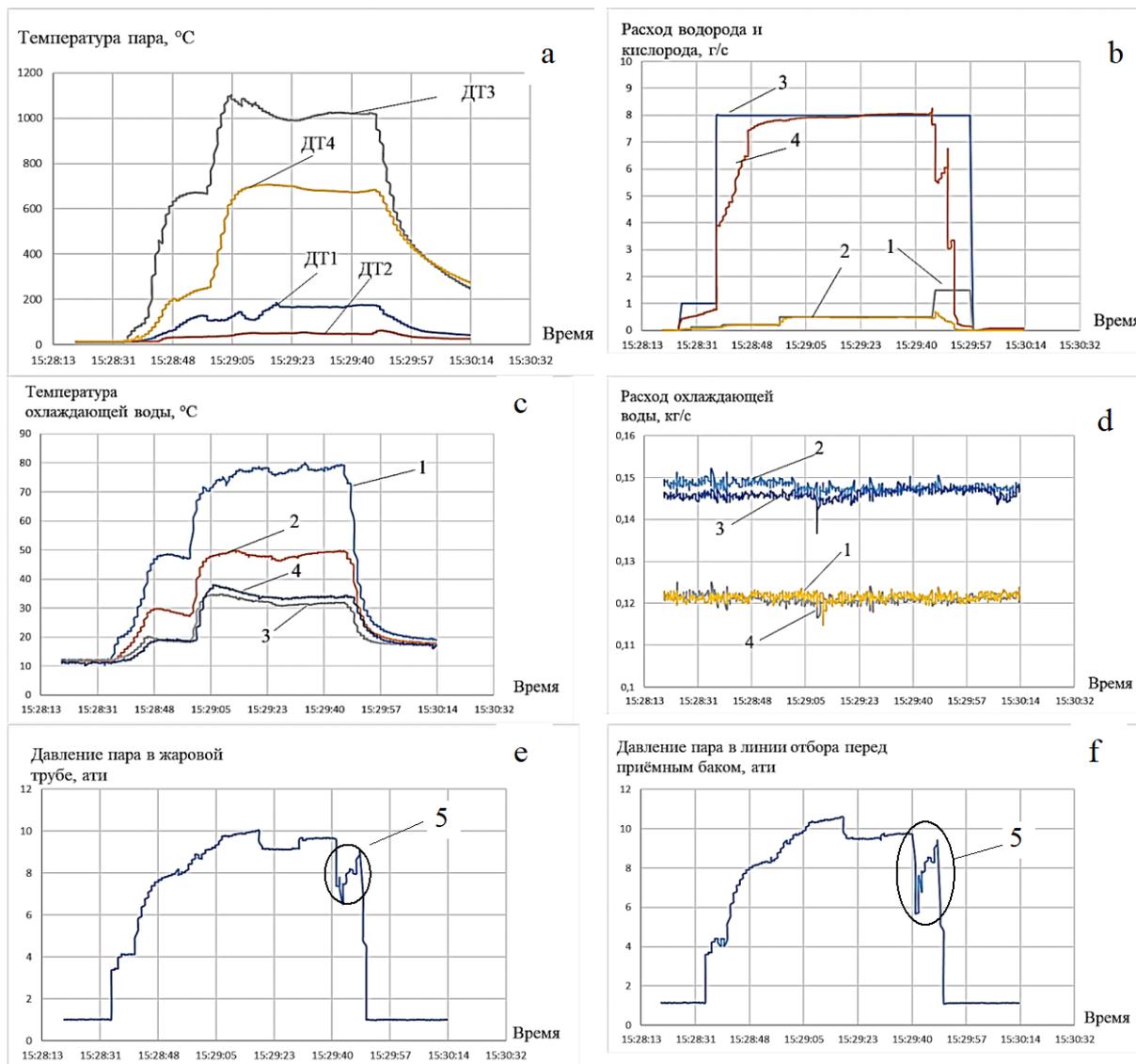


Рис. 3 – Результаты измерений в эксперименте при избытке кислорода, равном 2 (обозначения аналогично рис. 2)
Fig. 3 – The results of measurements in the experiment with an excess of oxygen equal to 2 (designations are similar to Fig. 2)

Практический интерес представляет определение содержания непрореагировавшего водорода в образующейся паре, температуры пара по секциям экспериментальной установки и времени прохождения пара от момента начала горения в первой секции до выхлопа в окружающую среду после 4-й секции.

Содержание непрореагировавшего водорода в образующейся паре определялось с учетом его рекомбинации по мере охлаждения диссоциированного пара. С этой целью применялся хроматограф, через который пропускалась отборная проба пара, в результате чего фиксировалось массовое содержание непрореагировавшего водорода. При этом отбор производился после 1-й и 4-й секций за счет открытия электроклапана 5 (ЭК-5 на схеме рис. 1) для заполнения приемного бака. В результате фиксировалось соответствующее падение давления с после-

дующим его подъемом до момента закрытия ЭК-5, после чего эксперимент прекращался (рис. 2e, 2f и рис. 3e, 3f). При этом дополнительно определялась массовая доля непрореагировавшего водорода теоретическим расчетным путем на основании справочных данных [29] по известным температуре, давлению и равновесному составу диссоциированного пара по выражению:

$$g_{H_2} = \frac{2x_{H_2}}{M_{\text{дис.пар}}},$$

где x_{H_2} – мольная доля непрореагировавшего водорода; $M_{\text{дис.пар}}$ – молекулярная масса диссоциированного пара.

В этой связи в ходе эксперимента определялась температура пара в 4-х точках согласно рис. 1. При

этом экспериментальное определение температуры получаемого пара в первой секции затруднено вследствие очень высокого ее значения из-за отсутствия необходимых огнеупорных средств измерений. По этой причине температура пара на выходе из каждой секции дополнительно определялась теоретическим расчетным путем на основании справочных данных [29] по энтальпии диссоциированного пара при известном давлении внутри жаровой трубы и в магистрали отбора пробы на химический анализ с учетом количества отводимого тепла от каждой секции, а

также теплоты диссоциации избыточного кислорода в варианте испытания с избытком окислителя.

4. Результаты экспериментальной оценки недожога водорода

На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные результаты по определению температуры и массовой доли непрореагировавшего водорода в ходе проведенных экспериментов.

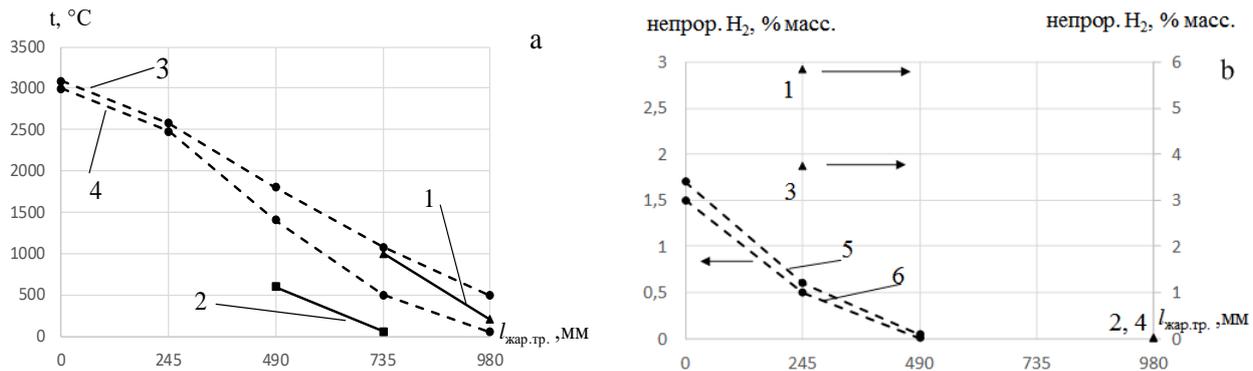


Рис. 4 – Температура и массовая доля непрореагировавшего водорода по длине жаровой трубы экспериментальной установки: а – 1, 2 – экспериментальные данные соответственно на оси потока пара и в пристеночном периферийном слое при давлении пара 1 МПа; 3, 4 – расчетные данные при стехиометрическом расходе компонентов и при избытке окислителя соответственно при давлении пара 1 МПа; б – 1, 2 – экспериментальные результаты при стехиометрическом расходе компонентов при давлении пара 0,4 МПа и 0,75 МПа соответственно при отборе пара на химический анализ после 1-й и 4-й секций; 3, 4 – экспериментальные данные при избытке окислителя при давлении пара 1 МПа и 0,75 МПа соответственно при отборе пара на химический анализ после 1-й и 4-й секций; 5, 6 – расчетно-теоретические результаты при стехиометрическом расходе компонентов и при избытке окислителя соответственно при давлении пара 1 МПа

Fig. 4 – Temperature and mass fraction of unreacted hydrogen along the length of the flame tube of the experimental setup: – 1, 2 – experimental data, respectively, on the axis of the vapor flow and in the peripheral layer at a vapor pressure of 1 MPa; 3, 4 – calculated data with a stoichiometric flow rate of components and with an excess of oxidizing agent, respectively, at a steam pressure of 1 MPa; б – 1, 2 – experimental results with stoichiometric flow rate of components at a steam pressure of 0.4 and 0.75 MPa, respectively, during the selection of steam for chemical analysis after the 1st and 4th sections; 3, 4 – experimental data with an excess of oxidizing agent at a steam pressure of 1 and 0.75 MPa, respectively, during the selection of steam for chemical analysis after the 1st and 4th sections; 5, 6 – calculated and theoretical results with a stoichiometric flow rate of components and with an excess of oxidizing agent, respectively, at a vapor pressure of 1 MPa

Отметки на горизонтальной оси соответствуют 4-м секциям, из которых состоит экспериментальная установка: 0÷245 мм – 1-я секция; 245÷490 – 2-я секция; 490÷735 – 3-я секция и 735÷980 – 4-я секция (см. рис. 1).

На рис. 4 видно, что согласно расчетно-теоретическим результатам по мере охлаждения пара вся рекомбинация непрореагировавшего водорода практически заканчивается к моменту выхода после второй секции жаровой трубы экспериментальной установки. По данным эксперимента на выходе из первой секции содержание непрореагировавшего водорода составило соответственно 5,8 % масс. и 3,7 % масс. при стехиометрическом и избыточном количестве кислорода, равного 2. Это можно объяснить значительной неравномерностью температурных полей по сечению жаровой трубы и механическим недожогом. При этом, в соответствии с экспериментальными измерениями, к моменту выхода пара из 4-й секции содержание непрореагировавшего водорода

составляло соответственно 0,016 % и 0,0138 % масс. при стехиометрическом и избыточном количестве кислорода, равного 1,4 (более ранний эксперимент). Следует также отметить, что в процессе движения продуктов сгорания в жаровой трубе на остаточное содержание непрореагировавшего водорода оказывает влияние время их пребывания, обусловленное конструктивными особенностями экспериментальной установки. Очевидно, что при избытке окислителя, равного 2, содержание непрореагировавшего водорода после первой секции снижается в ~ 1,5 раза.

Время пребывания пара в каждой секции по длине жаровой трубы экспериментальной установки от момента начала горения в 1-й секции до выхлопа в окружающую среду после 4-й секции определялось по выражению, с:

$$\tau_{\text{пар}}^{(n)} = \frac{l_n}{v_{\text{пар}}^{(n)}}$$

где n – порядковый номер секции жаровой трубы экспериментальной установки от начала горения до выхлопа в окружающую среду (принято от 1 до 4); l_n – длина соответствующей секции жаровой трубы экспериментальной установки, м; $v_{\text{пар}}^{(n)}$ – скорость движения пара по секциям жаровой трубы экспериментальной установки, м/с.

Итоговое время пребывания пара по мере движения через секции жаровой трубы составит, с:

$$\tau_{\text{пар}} = \sum_{n=1}^4 \tau_{\text{пар}}^{(n)}.$$

Скорость пара на выходе из n -й секции экспериментальной установки определялась по выражению, м/с:

$$v_{\text{пар}}^{(n)} = v_{\text{пар}}^{(n-1)} - \int_{T_2}^{T_1} dv_{\text{пар}}^{(n)}, \quad (1)$$

где $v_{\text{пар}}^{(n-1)}$ – скорость пара на выходе из предыдущей

секции, м/с; $\int_{T_2}^{T_1} dv_{\text{пар}}^{(n)}$ – прирост скорости пара в n -й

секции, м/с; T_1, T_2 – температура пара на входе и на выходе соответственно из n -й секции, К.

При этом начальная скорость пара определена по выражению, м/с:

$$v_{\text{пар}}^{(0)} = \frac{G_{\text{пар}} v}{f},$$

где $G_{\text{пар}}$ – массовый расход водородного пара, кг/с; v – удельный объем пара, м³/кг; f – площадь проходного сечения 1-й секции, м².

Все секции экспериментальной установки имеют одинаковое проходное сечение.

В (1) интегрирование ведется по температуре пара на входе и на выходе из каждой секции экспериментальной установки с учетом производной скорости пара по удельному объему и производной удельного объема пара по температуре. Таким образом, представив скорость пара функцией вида $v_{\text{пар}} = f(v(T))$, выражение для производной скорости пара примет вид:

$$\frac{dv}{dT} = \frac{dv}{dv} \frac{dv}{dT},$$

откуда

$$dv = \frac{dv}{dv} dv.$$

Дифференциал dv можно представить на основании функциональной зависимости удельного объема пара от температуры в виде $v = 4 \cdot 10^{-7} T^2 - 0,0012T + 1,5651$ на основании рис. 5.

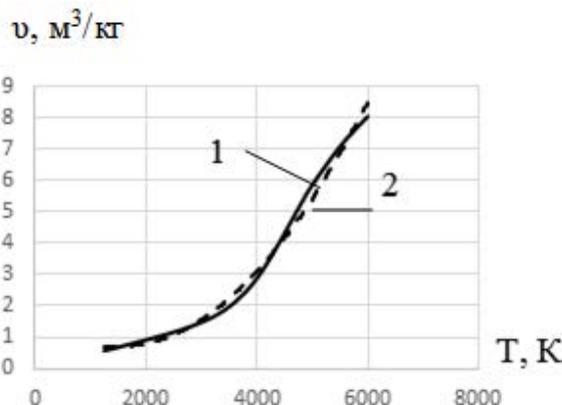


Рис. 5 – Зависимость удельного объема диссоциированного пара от температуры: 1 – табличная зависимость; 2 – линия тренда полиномиального типа

Fig. 5 – The dependence of specific volume from temperature of dissociated steam: 1 – tabular dependence; 2 – polynomial type trend line

В результате имеем:

$$dv = \frac{G}{f} (8 \cdot 10^{-7} T - 0,0012) dT.$$

На рис. 6 приведены результаты определения времени движения пара последовательно через секции жаровой трубы экспериментальной установки.

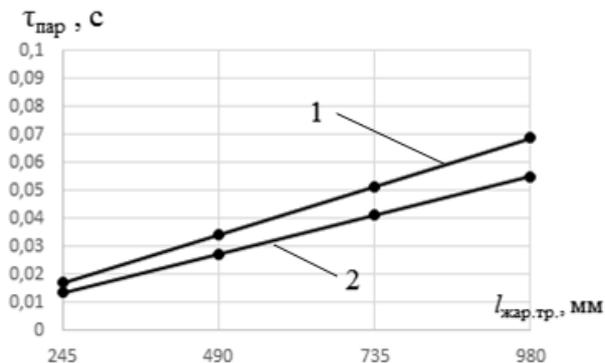


Рис. 6 – Время движения пара по длине жаровой трубы экспериментальной установки: 1 – эксперимент при стехиометрическом расходе водорода и кислорода; 2 – эксперимент при избытке кислорода

Fig. 6 – The steam movement time along the length of the flame tube of the experimental setup: 1 – experiment with a stoichiometric flow of hydrogen and oxygen; 2 – experiment with an excess of oxygen

Таким образом, суммарное время движения пара составляет 0,069 с для эксперимента при стехиометрическом расходе водорода и кислорода и 0,055 с



для эксперимента при избытке окислителя, что способствует доведению остаточного содержания непрореагировавшего водорода в результате рекомбинаций до значений 0,016 % и 0,0138 % масс. соответственно.

5. Заключение

Впервые выполнены эксперименты по сжиганию водорода в кислороде без смешения получаемого пара с охлаждающим агентом. Определено остаточное содержание непрореагировавшего водорода. Расчетно-теоретические оценки показали, что значительная неравномерность температурных полей по сечению жаровой трубы экспериментальной установки, механический недожог, а также время движения пара по длине жаровой трубы оказывают влияние на остаточное содержание непрореагировавшего водорода. Рекомбинация водорода в результате охлаждения пара практически завершается к моменту выхода из 2-й секции жаровой трубы экспериментальной установки. При этом по данным эксперимента с помощью химического анализа получаемого пара остаточное содержание непрореагировавшего водорода на выходе из 4-й секции составило 0,016 % масс и 0,0138 % масс.

Избыток окислителя заметно уменьшает содержание непрореагировавшего водорода в паре на начальной стадии его получения – в ~1,5раза.

Представленная методика определения времени пребывания пара внутри жаровой трубы экспериментальной установки показала свою эффективность. Время движения пара внутри жаровой трубы экспериментальной установки к моменту выхода из 4-й секции составляет 0,069 с для эксперимента при стехиометрическом расходе водорода и кислорода и 0,055 с для эксперимента при избытке окислителя, что способствует существенному снижению содержания непрореагировавшего водорода к моменту выхлопа пара.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант №15-19-10027.

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Science Foundation. Grant No. 15-19-10027.

Список литературы

- [1] Митрова Т., Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию / Т. Митрова, Ю. Мельников, Д. Чугунов. – Сколково (Московская школа управления), 2019. – 62 с.
- [2] Везируглу, Т.Н. Энергетическая система на основе термоядерного синтеза водорода / Т.Н. Везируглу // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 16–18. – С. 16–29.

[3] Новотны, Я. На пути к устойчивой энергетике: использование атомной энергии для производства водорода / Я. Новотны [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2017. – № 22–24. – С. 63–82.

[4] , Д.О'М. Оценка стоимости водорода как носителя ветровой и солнечной энергии / О'М. Бокрис, Т. Н. Везируглу // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2018. – № 10–12. – С. 34–42

[5] Скотт, Д.С. Почему водород? Потому что без водорода мы не сможем избежать климатической катастрофы / Д.С. Скотт // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2018. – № 19–21. – С. 34–39.

[6] Везируглу, Т.Н. Энергетика XXI века: водородная энергетическая система / Т.Н. Везируглу, С. Шахин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2019. – №4–6. – С. 14–27.

[7] Жизнин, С.З. Экономические аспекты развития ядерно-водородной энергетики в мире и в России / С.З. Жизнин, В.М. Тимохов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2020. – № 1–6. – С. 40–59.

[8] Аминов Р.З. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями / Р.З. Аминов, А.Н. Байрамов. – М.: Наука, 2016. – 254 с.

[9] Аминов, Р.З. Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками / Р.З. Аминов, В.Е. Юрин, А.Н. Егоров. – М.: Наука, 2018. – 238 с.

[10] Aminov, R.Z. Hydrogen oxygen steam generator for a closed hydrogen combustion cycle / R.Z. Aminov, A.N. Egorov // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – No. 21. – P. 11161–11167.

[11] Аминов, Р.З. Оценка системной эффективности водородного комплекса на основе замкнутого водородного цикла на АЭС / Р.З. Аминов, А.Н. Байрамов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2019. – № 22–27. – С. 42–52.

[12] Aminov, R.Z. Estimating the system efficiency of the multifunctional hydrogen complex at nuclear power plant / R.Z. Aminov, A.N. Bairamov, M.V. Garievskii // International journal of hydrogen energy. – 2020. – Vol. 45. – P. 14614–14624.

[13] Bairamov, A.N. Life cycle assessment of hydrogen energy facility by criterion for maximum load frequency / A.N. Bairamov // International journal of hydrogen energy. – 2019. – Vol. 44. – P. 5696–5703.

[14] Аминов, Р. З. Эффективность сжигания водорода с избытком окислителя в замкнутом водородном цикле на АЭС / Р.З. Аминов, А.Н. Егоров // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2019. – № 22–27. – С. 53–63.



[15] Locatelli, G. Load following of Small Modular Reactors (SMR) by cogeneration of hydrogen: A techno-economic analysis / G. Locatelli [et al.] // *Energy*. – 2018. – Vol. 148. – С. 494–505.

[16] Locatelli G. Cogeneration: An option to facilitate load following in Small Modular Reactors / G. Locatelli [et al.] // *Progress in Nuclear Energy*. – 2017. – Vol. 97. – P. 153–161.

[17] Шапиро, В.И. Повышение маневренности ПГУ при использовании водородно-кислородных парогенераторов / В.И. Шапиро, С.П. Малышенко, Б.Ф. Реутов // *Теплоэнергетика*. – 2011. – № 9. – С. 35–40.

[18] Пат. 2427048 РФ, МПК7 F 22B 1/26, G 21D5/16, F 01K3/18. Система сжигания водорода для паро-водородного перегрева свежего пара в цикле атомной электрической станции / Аминов Р.З., Байрамов А.Н.; заявители и патентообладатели Аминов Р.З., Байрамов А.Н. – № 2009117039/06; заявл. 04.05.2009; опубл. 20.08.2011, Бюл. № 23. – 8 с.: ил.

[19] Пат. 2488903 РФ, МПК7 G 21D5/16 (2006.01). Система сжигания водорода в цикле АЭС с регулированием температуры водород-кислородного пара / Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Юрин В.Е.; заявители и патентообладатели Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Юрин В.Е. – № 2012118303/07; заявл. 03.05.12; опубл. 27.07.13, Бюл. № 21. – 17 с.: ил.

[20] Пат. 2459293 РФ, МПК7, G 21D1/00. Турбинная установка атомной электростанции (варианты) / Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Егоров А.Н.; заявители и патентообладатели Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Егоров А.Н. – № 2011123255/07; заявл. 08.06.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. – 10 с.: ил.

[21] Haidn, O.J. Improved combustion efficiency of a H₂/O₂ steam generator for spinning reserve application / O. Haidn, [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 1998. – Vol. 23. – Iss. 6. – P. 491–497.

[22] Малышенко С.П. Эффективность генерации пара в водородно-кислородных парогенераторах мегаваттного класса мощности / С.П. Малышенко [и др.] // *Теплофизика высоких температур*. – 2012. – Т. 50. – № 6. – С. 820–829.

[23] Aminov, R.Z. On the issue of investigating the kinetics of processes in dissociated water steam / R.Z. Aminov, A.I. Schastlivtsev, A.N. Bairamov // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – Vol. 42. – No. 32. – P. 20843–20848.

[24] Schastlivtsev, A. Experimental study of the processes in hydrogen-oxygen gas generator / A. Schastlivtsev, D. Dunikov, V. Borzenko // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol. 44. – No. 18. – P. 9450–9455.

[25] Schastlivtsev, A.I. Hydrogen-oxygen steam generator applications for increasing the efficiency, maneuverability and reliability of power production / A.I. Schastlivtsev, V.I. Borzenko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 891. – No. 1. – P. 012213.

[26] Stathopoulos, P. Steam generation with stoichiometric combustion of H₂/O₂ as a way to simultaneously provide primary control reserve and energy storage / P.

Stathopoulos, T. Sleem, O. Paschereit. – 2017. – Vol. 205. – P. 692–702.

[27] Прибатурин, Н.А. Экспериментальное исследование процесса горения смесей водород-кислородиметан-кислород в среде слабонагретого водяного пара / Н.А. Прибатурин [и др.] // *Теплоэнергетика*. – 2016. – № 5. – С. 31–36.

[28] Борзенко, В. И. Эффективность генерации пара в водородно-кислородном парогенераторе киловаттного класса мощности / В. И. Борзенко, А. И. Счастливцев // *Теплофизика высоких температур*. – 2018. – Т. 56. – Вып. 6. – С. 946–952.

[29] Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

References

[1] Mitrova T., Melnikov Yu., Chugunov D. Hydrogen economy – the path to low-carbon development (Vodorodnaya ekonomika – put' k nizkouglerodnomu razvitiyu). Skolkovo (Moskovskaya shkola upravleniya), 2019; 62 p. (in Russ.).

[2] Veziroglu T.N. Energy system based on thermo-nuclear hydrogen synthesis. *International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;(16–18):16–29.

[3] Novotny Y. et al. On the way to sustainable energy: the use of atomic energy for hydrogen production. *International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;(22–24):63–82.

[4] Bokris D. O'M, Veziroglu T. N. Estimation of the cost of hydrogen as a carrier of wind and solar energy, *International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018;(10–12):34–42.

[5] Scott D. S. Why hydrogen? Because without hydrogen we cannot escape a climate catastrophe. *International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018;(19–21):34–49.

[6] Veziroglu T. N., Sahin S. Energy of the 21st century: hydrogen energy system. *International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2019;(4–6):14–27.

[7] Zhiznin S. Z., Timokhov V. M. Economic aspects of the development of nuclear-hydrogen energy in the world and in Russia. *International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2020;(1–6):40–59.

[8] Aminov R.Z., Bairamov A. N. Combination of hydrogen energy cycles with nuclear power plants (Kombinirovaniye vodorodnykh energeticheskikh tsiklov s atomnymi elektrostantsiyami), Moscow: Nauka Publ., 2016; 254 p. (in Russ.).

[9] Aminov R. Z., Yurin V. E., Egorov A. N. Combining NPPs with multifunctional power plants (Kombinirovaniye AES s mnogofunktsionalnym i energeticheskimi ustanovkami). Moscow: Nauka Publ., 2018; 238 p. (in Russ.).

[10] Aminov R.Z., Egorov A.N. Hydrogen-oxygen steam generator for a closed hydrogen combustion cycle.



International Journal of Hydrogen Energy, 2019;44(21):11161–11167.

[11] Aminov R.Z., Bairamov A. N. Assessment of the systemic efficiency of the hydrogen complex based on the closed hydrogen cycle at nuclear power plants. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019;(22–27):42–52.

[12] Aminov R. Z., Bairamov A. N., Garievskii M.V. Estimating the system efficiency of the multifunctional hydrogen complex at nuclear power plant. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020;(45):14614–14624.

[13] Bairamov A. N. Life cycle assessment of hydrogen energy facility by criterion for maximum load frequency, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019;(44):5696–5703.

[14] Aminov R.Z., Egorov A.N. Efficiency of burning hydrogen with excess oxidizer in a closed hydrogen cycle at nuclear power plants. *International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2019;(22–27):53–63.

[15] Locatelli G., Boarin S., Fiordaliso A., Ricotti M.E. Load following of Small Modular Reactors (SMR) by cogeneration of hydrogen: A techno-economic analysis. *Energy*, 2018;148:494–505.

[16] Locatelli G., Fiordaliso A., Boarin S., Ricotti M.E. Cogeneration: An option to facilitate load following in Small Modular Reactors. *Progress in Nuclear Energy*, 2017;97:153–161.

[17] Shapiro V.I. Increased maneuverability of CCGT when using hydrogen-oxygen steam generators (Povyshenie manevrennosti PGU pri ispol'zovanii vodorodno-kislorodnykh parogeneratorov). *Teploenergetika*, 2011;(9):35–40 (in Russ.).

[18] Patent 2427048 RU Hydrogen combustion system for steam-hydrogen overheating of fresh steam in the cycle of a nuclear power plant. (Sistema szhiganiya vodoroda dlya paro-vodorodnogo peregreva svezhego para v tsikle atomnoi elektricheskoi stantsii), 2011 (in Russ.).

[19] Aminov R.Z., Bairamov A. N. Patent 2488903 RU Hydrogen combustion system in a nuclear power plant cycle with temperature regulation of hydrogen-oxygen steam. (Sistema szhiganiya vodoroda v tsikle AES s regulirovaniem temperatury vodorod-kislorodnogo para), 2013 (in Russ.).

[20] Aminov R.Z., Bairamov A. N., Egorov A. N. Patent 2459293 RU Turbine plant of a nuclear power plant (options). (Turbinnaya ustanovka atomnoi elektrostantsii (varianty)), 2012 (in Russ.).

[21] Haidn O. J., Frohlike K., Carl J., Weingartner S. Improved combustion efficiency of a H₂/O₂ steam generator for spinning reserve application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1998;23(6):491–497.

[22] Malysenko S.P., Prigozhin V.I., Savich A.R., Schastlivcev A.I., Il'ichev V.A., Nazarova O.V. Steam generation efficiency in hydrogen-oxygen steam generators of megawatt power class (Effektivnost' generatsii para v vodorodno-kislorodnykh parogeneratorakh megavattnogo klassa moshchnosti). *Teplofizika vysokih temperatur*, 2012;50(6):820–829.

[23] Aminov R.Z., Schastlivtsev A.I., Bairamov A.N. On the issue of investigating the kinetics of processes in dissociated water steam. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017;42(32):20843–20848.

[24] Schastlivtsev A., Dunikov D., Borzenko V. Experimental study of the processes in hydrogen-oxygen gas generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019;44(18):9450–9455.

[25] Schastlivtsev A.I., Borzenko V.I. Hydrogen-oxygen steam generator applications for increasing the efficiency, maneuverability and reliability of power production. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017;891(1):012213.

[26] Stathopoulos P., Sleem T., Oliver Paschereit C. Steam generation with stoichiometric combustion of H₂/O₂ as a way to simultaneously provide primary control reserve and energy storage. *Applied Energy*, 2017;205:692–702.

[27] Pribaturin N.A., Fedorov V.A., Alekseev M.V., Bogomolov A.R., Sorokin A.L., Azihanov S.S., Shevryev S.A. An experimental study of the combustion process of hydrogen-oxygen and methane-oxygen mixtures in a medium of slightly superheated steam (Eksperimental'noe issledovanie protsessa goreniya smesei vodorod-kislorod i metan-kislorod v srede slaboperegretogo vodyanogo para). *Teploenergetika*, 2016(5):31–36.

[28] Borzenko V. I., Schastlivcev A. I. Efficiency of steam generation in a hydrogen-oxygen steam generator of a kilowatt power class (Effektivnost' generatsii para v vodorodno-kislorodnom parogeneratorakh kilovattnogo klassa moshchnosti). *Teplofizika vysokih temperatur*, 2018;56(6):946–952.

[29] Vargaftik N.B. Directory of thermophysical properties of gases and liquids (Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkostei), Moscow, 1972.

Транслитерация по BSI

