

УДК 620.92:62-622

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОСТАВА ГЕНЕРИРУЕМОГО ПАРА ПРИ СЖИГАНИИ ВОДОРОДА В КИСЛОРОДЕ

© 2020 г. Р. З. Аминов¹, *, А. И. Счастливец², **, А. Н. Байрамов¹

¹ФГБУН Саратовский научный центр РАН, г. Саратов, Россия

²ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: oerpran@inbox.ru

**E-mail: h2lab@mail.ru

Поступила в редакцию 18.07.2019 г.

После доработки 24.12.2019 г.

Принята к публикации 10.03.2020 г.

Проанализирован имеющийся экспериментальный опыт по сжиганию водорода со смешением получаемого пара с охлаждающим компонентом — паром или водой. Приведены результаты экспериментального испытания водород-кислородной камеры сгорания без смешения получаемого водяного пара с охлаждающим компонентом. Представлена методика и результаты определения степени недожога водорода в составе получаемого пара. Испытания проведены для условий стехиометрического горения и при избытке окислителя. Показано, что при стехиометрическом сжигании недожог водорода составляет 0.32 об. %, а при избытке кислорода, равном 1.4, — 0.27 об. %.

DOI: 10.31857/S0040364420030011

ВВЕДЕНИЕ

Использование водорода как энергоносителя в энергетике в первую очередь сопряжено с возможностью значительного перегрева рабочего тела электрических станций высокотемпературным паром, образующимся в результате окисления водорода кислородом, что приводит к повышению их мощности и КПД. В связи с этим в настоящее время имеются некоторые разработки различных горелочных устройств для окисления водорода кислородом.

Теоретические исследования полноты окисления водорода в кислороде необходимо подтвердить проведением экспериментальных исследований ввиду сложности протекания процесса. Анализ выполненных в этом направлении работ [1–12] позволяет выделить ряд наиболее важных факторов, оказывающих влияние на полноту окисления водорода:

— скорость охлаждения высокотемпературного пара и скорость смешения высокотемпературного пара с охлаждающим телом (так называемый эффект закалки);

— тип смешивающего элемента и связанная с этим интенсивность перемешивания;

— давление в камере сгорания.

Следует отметить, что работ по экспериментальному изучению горения водорода в кислороде при стехиометрическом соотношении компонентов без добавления охлаждающей воды не обнаружено. В основном рассматривается раз-

бавление полученного высокотемпературного пара охлаждающей водой или паром. Скорость охлаждения высокотемпературного пара зависит от охлаждающего агента (вода или водяной пар), а также способа его смешения с продуктами сгорания.

Первые результаты таких исследований при разбавлении высокотемпературного пара водой получены в Германии [1–4]. Камера сгорания водород-кислородного парогенератора имеет несколько специальных вставок в виде колец с форсунками для впрыска воды.

В России ряд работ [10–16] посвящен экспериментальному изучению горения водорода с кислородом. Рассмотрены различные устройства водород-кислородных парогенераторов с целью выработки водяного пара заданных параметров для использования в паротурбинном цикле теплоэнергетических установок. Главной особенностью этих парогенераторов является наличие организации охлаждения камер сгорания балластировочной водой, которая, смешиваясь с высокотемпературными продуктами сгорания водорода в кислороде, обеспечивает нужный температурный уровень рабочего тела.

В работах [5, 6, 8] отмечается, что увеличение расхода балластировочного компонента (пара или воды), впрыскиваемого в камеру сгорания, приводит к увеличению неполноты сгорания водород-кислородной смеси. Так, в работе [5] при увеличении массовой доли впрыскиваемой воды

по отношению к массовому расходу получаемого пара от 0.7 до 0.8 для охлаждения продуктов сгорания водорода в кислороде эффективность генерации пара (совершенство сжигания водорода) снижается с 0.95 до 0.9, т.е. содержание неконденсируемых непрореагировавших газов увеличивается с 5 до 10 об. % при соотношении кислорода к водороду 7.35–11.8. При этом в [6] отмечается, что достижение эффективности генерации пара, близкой к единице, возможно при минимальной массовой доле охлаждающей воды, равной ~0.6. Также в [6] показано влияние различных типов смесительных элементов на содержание неконденсируемых непрореагировавших газов, которое составило менее 2 об. % при коэффициенте избытка окислителя 0.93–1.05 и относительной массовой доле охлаждающей воды ≈0.7. При этом объемное содержание водорода следующее:

– 0.27 об. % при коэффициенте избытка окислителя 0.93 со струйными форсунками при пересекающихся струях водорода и кислорода под углом 15° в смесительном элементе;

– 0.37 об. % при коэффициенте избытка окислителя 0.91 со струйными форсунками при пересекающихся струях водорода и кислорода под углом 15° в смесительном элементе и с дополнительными форсунками водорода;

– 3.17 об. % при коэффициенте избытка окислителя 0.95 с сооснотруйными форсунками.

В работе [8] при сжигании стехиометрических расходов водорода с кислородом в среде водяного пара получено снижение объемной доли несгоревшей горючей смеси с 8–10 до 2% по мере увеличения доли водород-кислородной смеси в общем потоке водяного пара и горючей смеси с 2 до 30%. Таким образом, отмечается, что при работе с низкой концентрацией горючей смеси происходит самопроизвольный срыв факела и прекращение горения, о чем свидетельствует большее значение доли несгоревшей горючей смеси. К этому явлению может привести возмущение потока пара, вызванное кратковременным изменением его расхода. Особенно это связано с наличием в паре капель жидкой фазы, взрывное вскипание которых приводит к пульсациям и прекращению горения.

В работе [9] приведены результаты сжигания водорода со стехиометрическим расходом с кислородом при использовании охлаждения камеры сгорания балластировочной водой, которая затем смешивается с продуктами сгорания в специальной секции смешения, находящейся следом за камерой сгорания. По результатам химического анализа объемное содержание непрореагировавшего водорода составило 0.26–1.21 об. % в зависимости от температуры и давления в водородно-кислородном парогенераторе.

В рассмотренных выше работах изучается состав водяного пара, получаемого в результате

сжигания водорода с кислородом с принудительным охлаждением продуктов сгорания за счет смешения с паром или водой. В данном случае смешение с паром или водой – неизбежный шаг не только для регулирования температуры получаемого пара, но и для обеспечения надежности работы установки и ее сохранности. В то же время очевидно, что смешение определяет эффект заделки и тем самым не позволяет в большей мере прореагировать водороду, что приводит к его повышенному содержанию в составе получаемого пара.

В этой связи целью данной работы является экспериментальное определение непрореагировавшего водорода при его сжигании в кислороде без смешения с паром или водой. Следует отметить, что данная постановка эксперимента представлена и исследована впервые и является продолжением работы [16].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Совместно с ОИВТ РАН разработана экспериментальная установка, содержащая блок зажигания и жаровую трубу в виде последовательно соединенных четырех секций с внешним охлаждением каждой без смешения охлаждающей воды с получаемым паром (рис. 1).

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

Охлаждающая вода после охлаждения каждой секции отводится в сливную магистраль. Температура пара внутри жаровой трубы измеряется в четырех местах датчиками температуры (ДТ1–ДТ4) согласно рис. 1. Температура охлаждающей воды замеряется на выходе из каждой секции, а также определяются расход воды, расход 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 (ДД7).

Охлаждающая вода подается из специального бака насосом и циркулирует по контуру охлаждения. Водород и кислород подаются из баллонов с давлением 15 МПа. В экспериментальной установке предусмотрены регуляторы расхода водорода и кислорода.

На первоначальном этапе экспериментального исследования отбор пара на химический анализ производился на выходе из последней секции (рис. 1). По мере прохождения отборной пробы к баку-приемнику она отдает тепло окружающей среде. При этом непрореагировавший водород будет стремиться взаимодействовать с кислородом в сторону образования водяных паров, т.е. рекомбинировать, что в момент отбора снизит

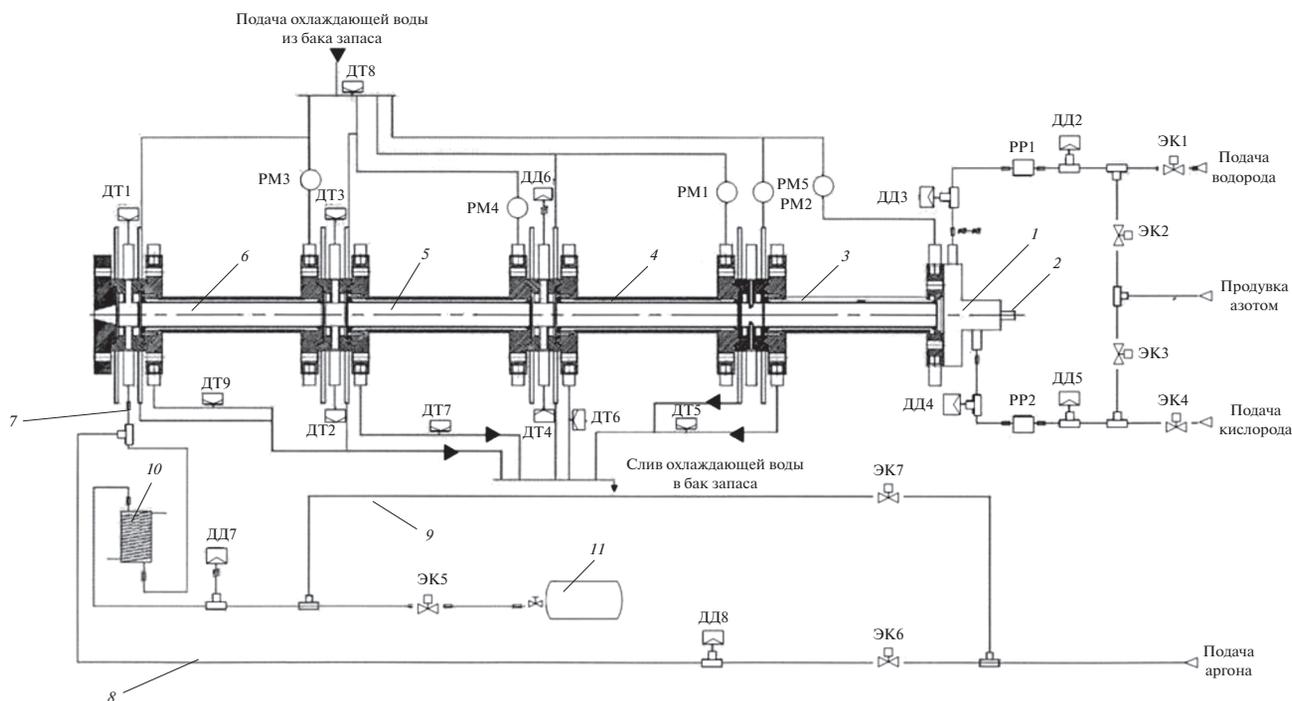


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – блок зажигания; 2 – запальная электросвеча; 3–6 – охлаждаемые секции жаровой трубы; 7 – отборная магистраль; 8, 9 – магистрали подачи аргона; 10 – змеевиковый охладитель отборной смеси газов; 11 – приемный бак; ДТ1, ДТ2, ДТ3, ДТ4 – датчики температуры пара; ДТ5, ДТ6, ДТ7, ДТ8, ДТ9 – датчики температуры охлаждающей воды; РМ1–РМ5 – датчики расхода охлаждающей воды; ДД2–ДД8 – датчики давления; РР1, РР2 – регуляторы расхода водорода и кислорода соответственно; ЭК1–ЭК7 – электроклапаны.

первоначальное его содержание в паре и не позволит достоверно определить недожог. С целью не допустить рекомбинации или существенно ее снизить следом за отбором пара в отборную трубку предусмотрена подача балластирующего газа – аргона – преимущественно по магистрали 8 (рис. 1). Магистраль 9 не использовалась. 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 поступала в приемный бак объемом 3 л. Определение содержания водорода в смеси проводилось ее пропуском через хроматограф после конденсации водяных паров (связано с особенностью его работы).

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.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕДОЖОГА ВОДОРОДА. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены испытания водород-кислородной камеры сгорания в режиме при стехиометрическом расходе водорода и кислорода, а также при избытке окислителя, равном 1.4. На рис. 2 и 3 приведены результаты измерений.

Определение недожога водорода основывалось на сопоставлении результатов измерений состава смеси на хроматографе для условий эксперимента и для контрольной смеси. Это объясняется особенностью работы хроматографа. Результаты измерений в нем представляются не в виде массового или объемного содержания, а в виде последовательности графических зависимостей напряжения от времени в форме пиков по каждому компоненту смеси. Здесь напряжение, измеряемое в мВ, соответствует количественному содержанию каждого компонента смеси, а время каждого пикового значения – моменту попадания и прохождения через детектор каждого компонента смеси отдельными малыми порциями. Для пересчета результатов измерений на массовое и объемное содержания водорода отдельно подготавливалась контрольная смесь при извест-

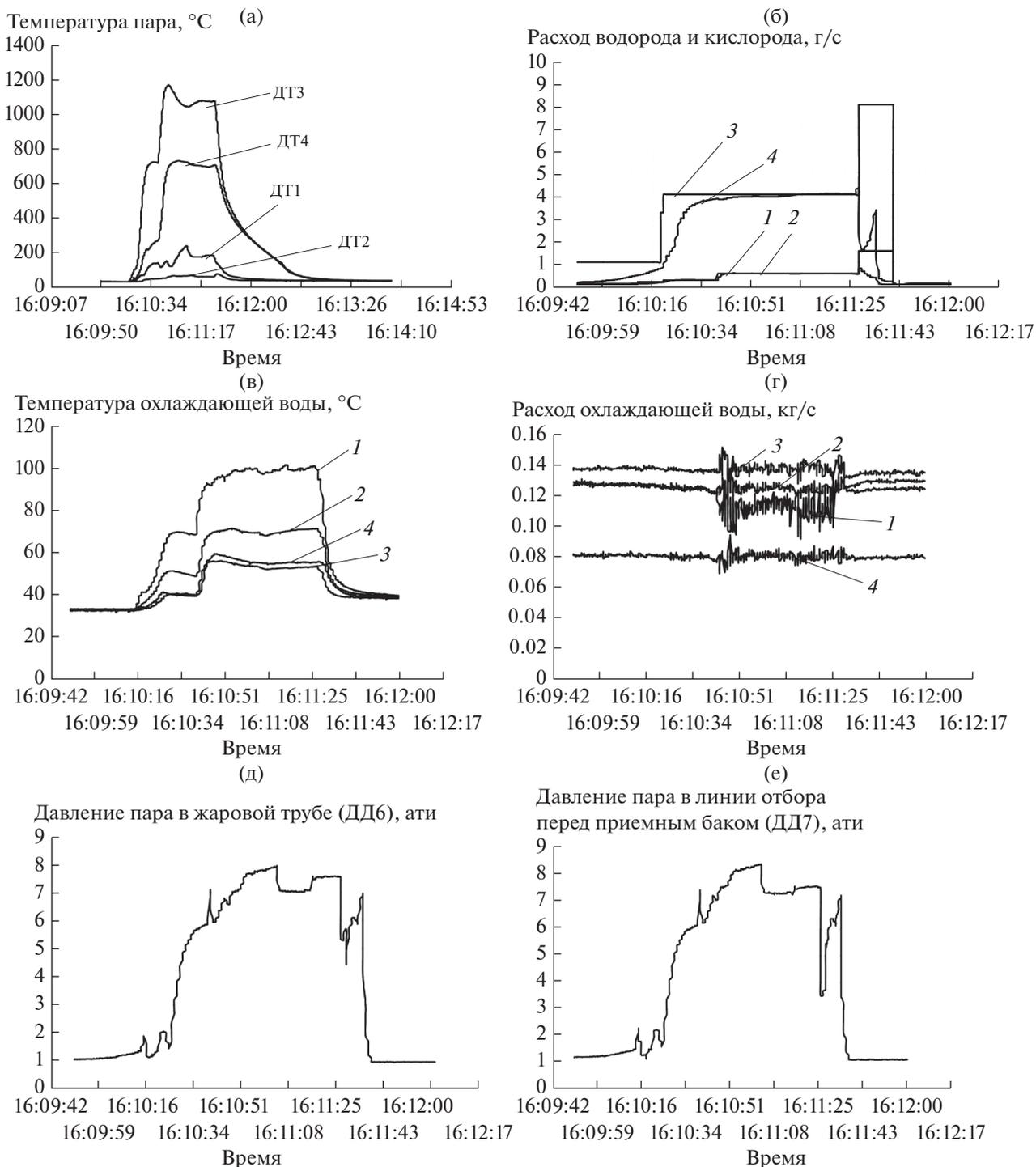


Рис. 2. Результаты измерений в эксперименте при стехиометрических расходах водорода и кислорода: (а) – показания датчика температуры пара: ДТ1 – на оси потока на выходе из четвертой секции, ДТ2 – в пристеночном потоке между третьей и четвертой секциями, ДТ3 – на оси потока между третьей и четвертой секциями, ДТ4 – в пристеночном потоке между второй и третьей секциями; (б) – значение уставки и фактический расход: 1, 2 – водорода; 3, 4 – кислорода; (в), (г) 1–4 – температура и расход охлаждающей воды в первой, второй, третьей и четвертой секциях соответственно; (д), (е) – давление пара в жаровой трубе (ДД6) и в линии отбора перед приемным баком (ДД7).

ном давлении, объеме и температуре с содержанием водорода и аргона. Относительно этой смеси определялось содержание водорода в составе

экспериментальной смеси сопоставлением результатов измерений на хроматографе и пересчетом на массовое и объемное содержания.

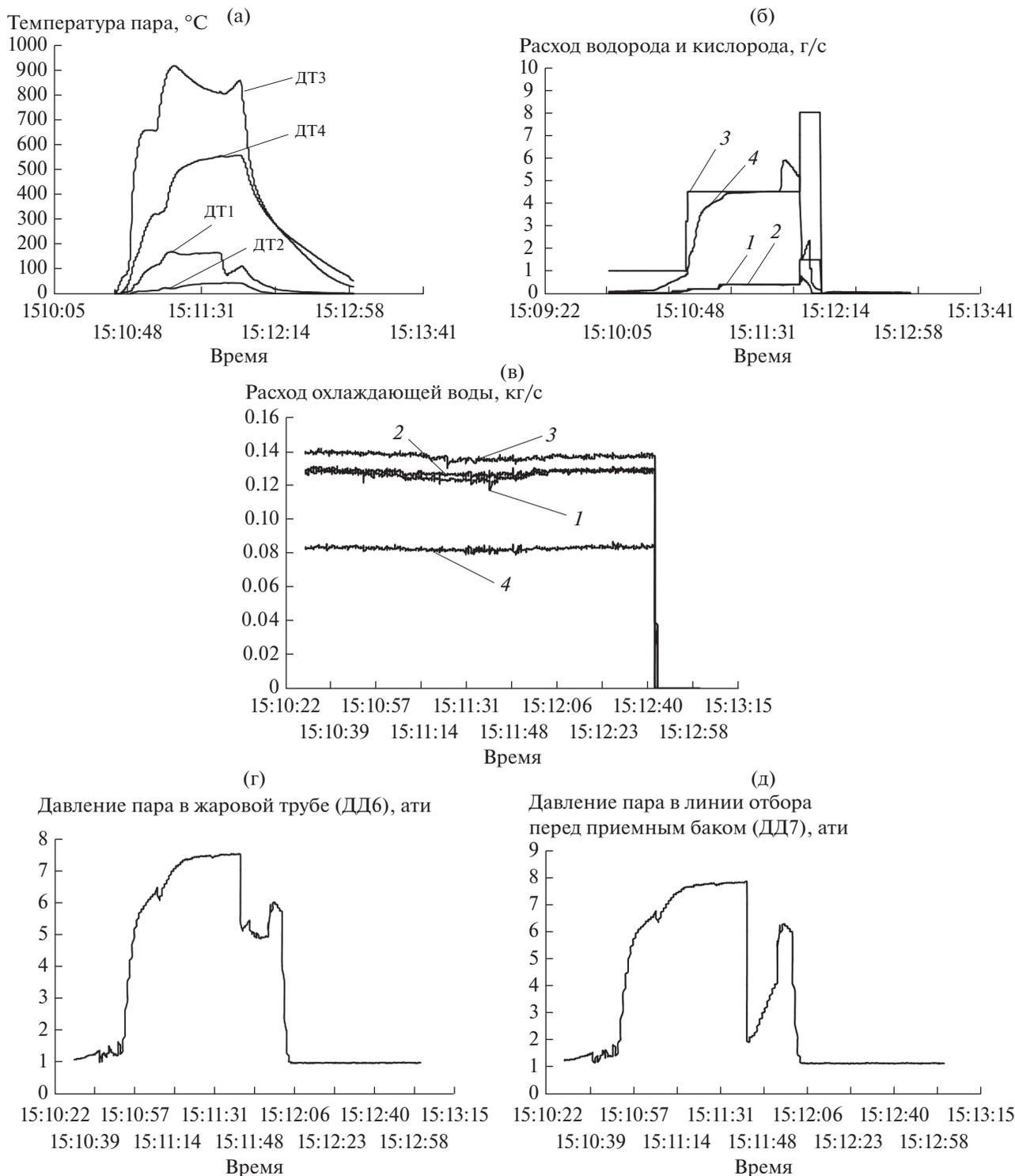


Рис. 3. Результаты измерений в эксперименте при избытке кислорода: (а)–(д) – см. рис. 2.

Методика пересчета основывалась на уравнении Клапейрона

$$pV = GRT, \quad (1)$$

где p – давление, Па; V – объем, м³; G – масса, кг; R – газовая постоянная, Дж/моль К; T – температура, К.

Первоначально определялась контрольная масса смеси с учетом конденсации водяных паров (сухие газы):

$$G_{см}^{контр} = G_{H_2}^{контр} + G_{Ar}^{контр} + G_{Ar_{ост}}^{контр}, \quad (2)$$

где $G_{H_2}^{контр}$, $G_{Ar}^{контр}$ – масса водорода и аргона соответственно, кг; $G_{Ar_ост}^{контр}$ – масса остаточного аргона в приемном баке после вакуумирования, кг.

С учетом (1) определены массы газов контрольной смеси. Соответствующее массовое содержание водорода (в %) определялось по выражению

$$\alpha_{H_2}^{мас_контр} = \frac{G_{H_2}^{контр}}{G_{см}^{контр}} \times 100. \quad (3)$$

Массовое содержание водорода в экспериментальной смеси рассчитывалось относительно его массового содержания в контрольной смеси по известному соотношению показаний хроматографа

$$\alpha_{H_2}^{мас_экспер'} = \alpha_{H_2}^{мас_контр} \frac{S_{экспер}}{S_{контр}}, \quad (4)$$

где $S_{контр}$, $S_{экспер}$ – содержание водорода в контрольной смеси и в экспериментальной смеси соответственно по результатам показаний хроматографа, мВ.

Следует отметить, что в (4) содержание водорода в экспериментальной смеси по показаниям хроматографа определено с учетом возможного остаточного содержания водяных паров, а также непрореагировавшего кислорода.

Масса (в кг) непрореагировавшего водорода в экспериментальной смеси определялась относительно контрольной массы смеси следующим образом:

$$G_{H_2}^{экспер} = \frac{\alpha_{H_2}^{мас_экспер'}}{100} G_{см}^{контр}. \quad (5)$$

Соответствующая масса аргона в экспериментальной смеси рассчитывалась как

$$G_{Ar}^{экспер} = \left(1 - \frac{\alpha_{H_2}^{мас_экспер'}}{100} \right) G_{см}^{контр}. \quad (6)$$

С учетом массового содержания водяных паров экспериментальная масса смеси составит

$$G_{см}^{экспер} = G_{H_2}^{экспер} + G_{Ar}^{экспер} + G_{Ar_ост}^{экспер} + G_{H_2O}^{экспер},$$

где $G_{H_2O}^{экспер}$ – масса водяных паров в экспериментальной смеси, кг.

Поскольку давление вакуумирования приемного бака как при подготовке контрольной смеси, так и для экспериментальной смеси при отборе пробы одинаково и равно 2 кПа, то остаточное содержание аргона принято одинаковым, т.е.

$$G_{Ar_ост}^{экспер} = G_{Ar_ост}^{контр}.$$

На основании закона Дальтона парциальное давление водяных паров в экспериментальной смеси составит

$$p_{парц}^{H_2O} = p_{см} - p_{парц}^{H_2} - p_{парц}^{Ar},$$

где $p_{парц}^{H_2}$, $p_{парц}^{Ar}$ – парциальные давления водорода и аргона, в том числе остаточного аргона в приемном баке, ати; $p_{см}$ – давление смеси газов, ати.

В проведенных экспериментах установившееся давление смеси в приемном баке после закрытия электроклапана определено по результатам экспериментов (рис. 2е и рис. 3д) и составило 7.1 и 6.05 ати соответственно.

Парциальные давления (в Па) водорода и аргона находятся согласно выражению

$$p_{парц}^i = G_i^{экспер} \frac{RT_{см}}{V_{см}} \quad (i = H_2, Ar),$$

где $T_{см}$, $V_{см}$ – температура (К) и объем смеси (м³) соответственно.

Объем смеси приравнивается к объему приемного бака, равному 0.003 м³, и, согласно закону Дальтона, каждый газ в смеси занимает этот объем.

В экспериментальной установке технически не предусмотрено измерение температуры смеси в приемном баке, поэтому она определялась расчетным путем. Определялось значение температуры насыщения водяных паров при парциальном давлении в приемном баке методом итераций с использованием таблиц свойств воды и водяного пара.

Таким образом, по уравнению Клапейрона рассчитывается масса водяных паров в экспериментальной смеси:

$$G_{H_2O}^{экспер} = \frac{p_{парц}^{H_2O} V_{см}}{R_{H_2O} T_{см}}. \quad (7)$$

Массовое содержание водорода в экспериментальной смеси тогда равно

$$\alpha_{H_2}^{мас_экспер''} = \frac{G_{H_2}^{экспер}}{G_{см}^{экспер}} \times 100.$$

Объемное содержание водорода в экспериментальной смеси определялось по аналогичной методике. Первоначально содержание рассчитывалось для контрольной смеси с учетом конденсации водяных паров, а затем с учетом содержания паров воды в смеси на основании закона Амага, согласно которому сумма приведенных объемов газов в смеси равна объему смеси.

При учете конденсации водяных паров закон Амага для контрольной смеси примет вид

$$V_{H_2}^{контр} + V_{Ar}^{контр} + V_{Ar_ост}^{контр} = V_{см}^{контр},$$

где $V_{H_2}^{экспер}$, $V_{Ar}^{экспер}$, $V_{Ar_ост}^{экспер}$ – приведенные объемы водорода, аргона и остаточного аргона в приемном баке в составе контрольной смеси после вакуумирования соответственно, м³; $V_{см}^{контр}$ – объем

Результаты определения массового и объемного содержания водорода в паре

Эксперимент	$\alpha_{H_2}^{мас_экспер'}$, мас. %		$r_{H_2}^{об_экспер'}$, об. %	
	без водяного пара	с учетом водяного пара	без водяного пара	с учетом водяного пара
Стехиометрические расходы	0.017	0.016	0.37	0.32
Избыток кислорода – 1.4	0.014	0.0138	0.296	0.27

контрольной смеси газов (приравнивается к объему приемного бака), м³.

Приведенный объем *i*-го газа в контрольной смеси вычисляется по выражению

$$V_{i_прив} = \frac{G_i R_i T_{см}}{P_{см}} \quad (8)$$

При этом масса каждого газа в смеси определяется на основании (2)–(6).

Отношение приведенных объемов газов к объему смеси есть объемная доля *i*-го газа в смеси:

$$r_i = \frac{V_{i_прив}}{V_{см}} \quad (9)$$

Тогда с учетом (8) и (9) объемное содержание водорода в контрольной смеси определяется по выражению

$$r_{H_2}^{об_контр} = \frac{V_{H_2}^{контр}}{V_{см}^{контр}} \times 100,$$

а объемное содержание водорода в экспериментальной смеси:

$$r_{H_2}^{об_экспер'} = r_{H_2}^{об_контр} \frac{S_{экспер}}{S_{контр}}.$$

Аналогично находилось объемное содержание для аргона.

Закон Амага для экспериментальной смеси газов с учетом содержания водяных паров:

$$V_{H_2}^{экспер} + V_{Ar}^{экспер} + V_{Ar_ост}^{экспер} + V_{H_2O}^{экспер} = V_{см}^{экспер}.$$

При этом объемное содержание каждого газа в смеси определялось на основании (8), а при определении объемного содержания водяных паров учитывалось также соотношение (7).

Таким образом, объемное содержание водорода в экспериментальной смеси с учетом (9) составляет

$$r_{H_2}^{об_экспер'} = \frac{V_{H_2}^{экспер}}{V_{см}^{экспер}} \times 100.$$

В таблице приведены результаты определения массового и объемного содержания водорода в проведенных экспериментах.

Очевидно, что избыток окислителя способствует уменьшению недожога водорода в получаемом паре. В то же время стехиометрические расходы водорода и окислителя определяют незначительный недожог водорода. Впервые полученные результаты представляют практическую важность по исследованию горения водорода в кислороде без смешения с охлаждающей водой либо паром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сжигание водорода в среде кислорода представляет собой важнейшее научно-практическое направление в теплоэнергетике, поскольку при сжигании водорода образуется водяной пар – главное рабочее тело тепловых электростанций. Одним из необходимых условий при сжигании водорода, очевидно, является организация охлаждения пара с целью получения необходимой температуры, а также сохранения работоспособности и надежности водород-кислородной камеры сгорания. При этом охлаждающая вода после внешнего охлаждения камеры сгорания смешивается с получаемым паром. Такой подход создает повышенное содержание водорода в получаемом паре. Достигнутые результаты по недожогу водорода изменялись в диапазоне 0.26–3.17 об. %

В настоящей работе впервые проведены экспериментальные исследования по горению водорода в кислороде без смешения с охлаждающим агентом, только с внешним охлаждением. Полученные результаты по недожогу при стехиометрическом соотношении с кислородом составили 0.32 об. %. При коэффициенте избытка кислорода 1.4 недожог водорода снизился и достиг 0.27 об. %. При этом массовое содержание водорода составило 0.016 и 0.0138 об. % соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о снижении недожога водорода при отсутствии смешения пара с охлаждающим агентом, по данным, полученным экспериментально другими авторами.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 15-19-10027).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peschka W.* Hydrogen Combustion in Tomorrow's Energy Technology // *Int. J. Hydrogen Energy*. 1987. V. 12. № 10. P. 481.
2. *Sternfeld H.J., Heinrich P.A.* Demonstration Plant for the Hydrogen/Oxygen Spinning Reserve // *Int. J. Hydrogen Energy*. 1989. V. 14. Iss. 10. P. 703.
3. *Frühlke K., Haidn O.J.* Spinning Reserve System Based on H₂/O₂ Combustion // *Energy Convers. Mgmt.* 1997. V. 38. № 10–13. P. 983.
4. *Haidn O.J., Frühlke K., Carl J., Weingartner S.* Improved Combustion Efficiency of a H₂/O₂ Steam Generator for Spinning Reserve Application // *Int. J. Hydrogen Energy*. 1998. V. 23. Iss. 6. P. 491.
5. *Бебелин И.Н., Волков А.Г., Грязнов А.Н., Малышенко С.П.* Разработка и исследование экспериментального водород-кислородного парогенератора мощностью 10 МВт(т) // *Теплоэнергетика*. 1997. № 8. С. 48.
6. *Малышенко С.П., Пригожин В.И., Савич А.Р., Счастливцев А.И., Ильичев В.А., Назарова О.В.* Эффективность генерации пара в водородно-кислородных парогенераторах мегаваттного класса мощности // *ТВТ*. 2012. Т. 50. № 6. С. 820.
7. *Шапиро В.И., Малышенко С.П., Реутов Б.Ф.* Повышение маневренности ПГУ при использовании водородно-кислородных парогенераторов // *Теплоэнергетика*. 2011. № 9. С. 35.
8. *Прибатурин Н.А., Федоров В.А., Алексеев М.В., Богомолов А.Р., Сорокин А.Л., Азиханов С.С., Шевырев С.А.* Экспериментальное исследование процес-
са горения смесей водород–кислород и метан–кислород в среде слабонагретого водяного пара // *Теплоэнергетика*. 2016. № 5. С. 31.
9. *Борзенко В.И., Счастливцев А.И.* Эффективность генерации пара в водородно-кислородном парогенераторе киловаттного класса мощности // *ТВТ*. 2018. Т. 56. Вып. 6. С. 946.
10. *Пиралишвили Ш.А., Гурьянов А.И., Федоров В.А.* Вихревой водород-кислородный пароперегреватель. Патент РФ № 2361146. Б.И. № 19. 2009.
11. *Пиралишвили Ш.А., Гурьянов А.И., Федоров В.А.* Мини-парогенератор. Патент РФ № 2300049. Б.И. № 15. 2007.
12. *Грязнов А.Н., Малышенко С.П.* Парогенератор. Патент РФ № 2309325. Б.И. № 30. 2007.
13. *Грязнов А.Н., Малышенко С.П.* Водородный высокотемпературный парогенератор с комбинированным испарительным охлаждением камеры смешения. Патент РФ № 2358190. Б.И. № 16. 2009.
14. *Грязнов А.Н., Малышенко С.П.* Водородный высокотемпературный парогенератор с комбинированным испарительным охлаждением камеры смешения. Патент РФ № 2358191. Б.И. № 16. 2009.
15. *Коровин Г.К., Лозино-Лозинская И.Г., Осколков Н.В., Воробьев Б.А., Шигин Р.Л.* Парогенератор (варианты). Патент РФ № 2431079. Б.И. № 28. 2011.
16. *Aminov R.Z., Schastlivtsev A.I., Bairamov A.N.* On the Issue of Investigating the Kinetics of Processes in Dissociated Water Steam // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2017. № 42. P. 20843.