

УДК 620.97,620.92

ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2020 г. А. И. Счастливец¹, *, Д. О. Дуников¹, В. И. Борзенко¹, Д. П. Шматов²

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

*E-mail: h2lab@mail.ru

Поступил в редакцию 26.11.2019 г.

После доработки 28.01.2020 г.

Принят к публикации 10.03.2020 г.

В обзоре проанализированы основные типы и конструкции водородно-кислородных установок, таких как водородно-кислородные парогенераторы, пароперегреватели и воздухонагреватели различного уровня мощности. Определены основные проблемы, возникающие при разработке, создании и испытании таких установок, включая проблемы охлаждения наиболее теплонапряженных узлов, смешения и смесеобразования основных компонентов топлива и окислителя, смешения высокотемпературных продуктов сгорания и балластировочных компонентов, проблемы, связанные с полнотой сгорания водорода и обеспечения безопасности при работе. Рассмотрены основные области использования в стационарной и автономной энергетике, в том числе применение для повышения маневренности и эффективности электростанций с паровыми турбинами, в системах аккумулирования энергии для автономного энергоснабжения с возобновляемыми источниками энергии и другие.

DOI: 10.31857/S0040364420050087

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

Основные типы и конструкции водородно-кислородных установок и их основных узлов

Основные проблемы, возникающие при разработке, создании и испытании водородосжигающих установок

Надежное охлаждение наиболее теплонапряженных узлов водородно-кислородного парогенератора

Обеспечение равномерности поля температур на выхлопе водородно-кислородного парогенератора

Обеспечение смешения компонентов и высокой полноты сгорания водорода

Теоретическое изучение полноты сгорания водорода в кислороде

Экспериментальное изучение полноты сгорания водорода в кислороде

Основные области использования ВКУ в стационарной и автономной энергетике

Дополнительные аккумулирующие надстройки для производства пиковых мощностей

Перегрев пара перед турбиной

Водородные системы аккумулирования электроэнергии

Другие потенциальные области использования водородно-кислородных парогенераторов

Заключение

Список литературы

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мировая энергетика переживает период важных структурных изменений и одной из основных тенденций является постоянный рост ежегодного ввода мощностей возобновляемых источников энергии. Для обеспечения устойчивости энергосистем и гарантии качества электроснабжения распространение возобновляемых источников энергии должно быть подкреплено системами хранения энергии. Водород рассматривается как эффективный и экологически чистый вторичный энергоноситель для аккумулирования энергии в энергосистемах будущего [1]. Однако современные водородные технологии остаются относительно дорогостоящими, особенно в областях, связанных с получением и использованием водорода, и нуждаются в существенной государственной поддержке. Россия практически не имеет производственных мощностей, необходимых для обеспечения рынка водородными энергоустановками, и некоторые исследователи считают необоснованным резкий переход к водородной энергетике [2]. Между тем проблему с использованием водорода в области больших мощностей могут решить водородно-кислородные установки (ВКУ), технологии для производства которых хорошо освоены в России.

Водород как топливо для энергоустановок имеет ряд важных особенностей: высокую теплоту сгорания, широкие концентрационные пределы воспламенения и устойчивого горения, высо-

кие скорости распространения пламени (в 7 раз выше, чем для метана), низкие энергии активации при сгорании в кислороде и воздухе. Удельные тепловые мощности, передаваемые через сечение сопла камеры сгорания, для водорода в 1.7 раза выше, чем для метана. Эти свойства водорода позволяют обеспечить высокую стабильность работы камер сгорания в широком интервале составов топливно-окислительной композиции, относительно небольшие размеры водородных парогенераторов и их умеренную стоимость. Продукт сгорания водорода — водяной пар — при температуре окружающей среды почти полностью конденсируется, т.е. эксергия водорода как топлива может быть использована с максимальной эффективностью. Для энергетики имеет большое значение то обстоятельство, что при сгорании стехиометрической смеси водорода в кислороде образуется чистый перегретый водяной пар — рабочее тело современных паротурбинных установок. При этом передача тепла от топлива к рабочему телу может осуществляться наиболее эффективно — путем смешения продуктов сгорания (перегретого водяного пара с высокой температурой) с рабочим телом (водой или водяным паром), т.е. с минимальными потерями эксергии топлива.

Технология сжигания водорода в кислороде с целью получения высокотемпературного водяного пара или воздуха, реализуемая в водородно-кислородных парогенераторах, пароперегревателях и воздухонагревателях, позволяет создавать установки с высокой удельной мощностью и без вредных выбросов в процессе работы. Высокая скорость протекающих в них процессов (сгорание водорода, теплопередача, смешение компонентов и т.д.) обеспечивает минимальное время запуска и выхода на режим, что особенно важно в случае использования подобных технологий в качестве резервных источников энергии.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫХ УСТАНОВОК И ИХ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ

Впервые идея создания водородно-кислородной установки предложена в начале 80-х годов XX в. в работах ОИВТ РАН и Германского Центра авиации и космонавтики [3–10] для применения в составе дополнительной аккумулирующей надстройки на электрической станции для производства пиковых мощностей.

Первые экспериментальные образцы ВКУ мегаваттного класса мощности были созданы в Германии (Центр авиации и космонавтики) [11–14] и России (ОИВТ РАН, “Центр Келдыша”, АО “Конструкторское бюро химавтоматики”) к концу 1990-х годов [15–18]. В этих же организациях впервые созданы и испытаны агрегаты ки-

ловаттного класса мощности [18, 19]. Позже исследования процессов в ВКУ киловаттного класса выполнялись в Японии по программе WE-NET [20, 21] и ряде отечественных организаций [22–25].

Водородно-кислородные установки можно классифицировать по типу используемого теплоносителя (балластировочного компонента), по технологиям, применяемым для создания камеры сгорания, и по типу смешения водорода с кислородом. По типу балластировочного компонента можно выделить два основных типа ВКУ:

- водородно-кислородные парогенераторы и пароперегреватели [25–28];
- водородно-кислородные воздухонагреватели [29].

В большинстве случаев балластировочный компонент используется одновременно и для охлаждения стенок камеры сгорания. Тип используемого балластировочного компонента определяет область применения ВКУ. При использовании воды и водяного пара конечным продуктом ВКУ является перегретый водяной пар, который далее может применяться в качестве рабочего тела в паровых турбинах [16, 30–32]. При использовании воздуха на выходе получается воздух, нагретый до определенной температуры, который далее используется в качестве рабочего тела в газовых турбинах [33]. Водородно-кислородные парогенераторы и пароперегреватели имеют большее распространение, чем водородно-кислородные воздухонагреватели, что обусловлено разными областями их применения (будет рассмотрено в дальнейшем).

По типу технологий, используемых для создания камеры сгорания можно также выделить два основных типа ВКУ:

- на технологиях ракетостроения;
- на технологиях газотурбостроения.

Экспериментальные образцы с использованием ракетных технологий созданы в России [18, 25, 27, 28, 34, 35] и Германии [26, 36], а с использованием газотурбинных технологий в Японии [20, 21]. Основными особенностями экспериментальных образцов (рис. 1), созданных в России и Германии, являются:

- высокая удельная мощность, достигающая $100 \text{ МВт(т)}/\text{м}^3$;
- низкое содержание недогоревших компонентов водорода и кислорода на выходе (суммарно менее 2 об. %);
- широкий диапазон мощностей созданных экспериментальных моделей (от 20 кВт до 40 МВт(т));
- минимальное время запуска и выхода на рабочий режим (менее 10 с);
- использование воды в качестве охладителя и балластировочного компонента;

- возможность работы как на газообразных, так и на жидких компонентах окислителя.

В то же время следует отметить, что при создании вышеуказанных экспериментальных образцов применяются относительно дорогие материалы (бронза и жаропрочная сталь), а для создания некоторых узлов (смесительный элемент, камера сгорания и т.д.) требуется использование высокоточных технологий и станков. Кроме того, высокие тепловые напряжения, возникающие в наиболее теплонапряженных узлах, снижают ресурс таких установок.

Экспериментальные образцы ВКУ, использующие технологии газотурбостроения, созданы только в Японии. Такие ВКУ имеют следующие характерные особенности:

- в качестве охладителя и балластировочного компонента применяется водяной пар;
- в качестве прототипа камеры сгорания используется камера сгорания штатной газовой турбины;
- время запуска и выхода на рабочий режим зависит от поступления в камеру сгорания необходимого расхода водяного пара для охлаждения стенок камеры сгорания;
- ресурс работы может соответствовать ресурсу работы газотурбинной камеры сгорания.

К недостаткам подобных установок следует отнести слабую проработанность камеры сгорания, в результате чего полнота сгорания компонентов сильно зависит от режима работы, поскольку в камере сгорания газовой турбины полнота сгорания топлива достигается путем его смешения с избыточным расходом окислителя (воздуха), а в данном водородно-кислородном парогенераторе реакция происходит при избыточной концентрации водяного пара, который является продуктом реакции, т.е. ингибитором процесса. Кроме того, для запуска такого парогенератора необходимо наличие пара определенной давления и температуры, что существенно сужает область его применения.

Наиболее перспективными для водородно-кислородных парогенераторов являются технологии ракетостроения, поскольку они обеспечивают более высокую полноту сгорания водорода, более компактны, имеют меньшее время запуска и выхода на рабочий режим.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ, СОЗДАНИИ И ИСПЫТАНИИ ВОДОРОДОСЖИГАЮЩИХ УСТАНОВОК

Надежное охлаждение наиболее теплонапряженных узлов водородно-кислородного парогенератора. Использование пара из ВКУ в паровых турбинах обуславливает необходимость обеспечения



Рис. 1. Экспериментальный водородно-кислородный парогенератор тепловой мощностью до 25 разработки ОИВТ РАН на стенде АО «КБХА» (Россия).

их высокого КПД. Основные потери в ВКУ связаны с неполным сгоранием водорода и с тепловыми потерями в окружающую среду. С охлаждающей водой от теплонапряженных частей парогенератора может отводиться до 5–7% всего выделившегося тепла [31, 34]. Исходя из этого, для обеспечения высокого КПД необходимо использовать всю охлаждающую воду для производства пара. Это в свою очередь влечет за собой необходимость создания такой конструкции камеры сгорания, которая обеспечит нужное охлаждение при ограниченном расходе воды.

Обеспечение надежного охлаждения наиболее теплонапряженных узлов водородно-кислородного парогенератора является важной конструкторской задачей. В частности, в работе [37] авторы утверждают, что обычно тепловые потоки в камере сгорания водородно-кислородного парогенератора составляют до 20 МВт/м².

Для разрешения данной проблемы в основном применяется комбинированная система охлаждения стенок камеры сгорания [18, 26, 27, 31, 34, 36, 38, 39]. Во-первых, используется внешнее охлаждение стенок камеры сгорания, которые изготовлены из жаропрочной бронзы, обеспечивающей высокую теплопроводность, что не позволяет стенкам нагреваться более 150 градусов. Во-вторых, применяется внутреннее охлаждение за счет орошения пристеночного слоя небольшим количеством воды, что также снижает температуру стенок камеры сгорания и обеспечивает более длительный ресурс ее работы. За счет разделения потоков охлаждающей воды на внутренний и внешний достигается снижение концентрации водяного пара в зоне горения, что приводит к повышению полноты сгорания топлива.

В некоторых работах приведены конструкции водородно-кислородных парогенераторов с камерой сгорания, охлаждаемой только с внутрен-

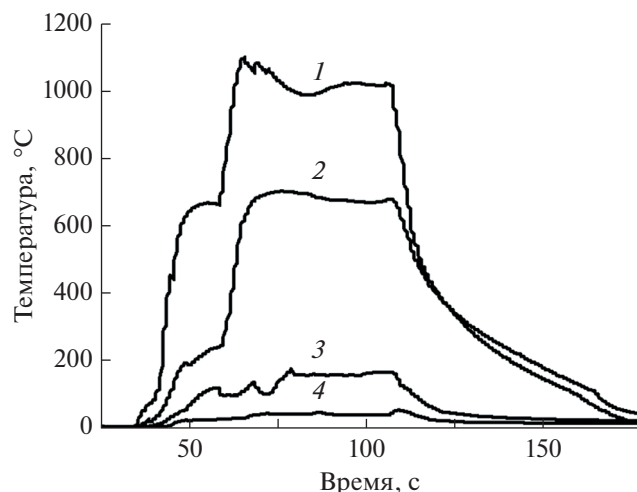


Рис. 2. Температуры продуктов сгорания в тракте водородно-кислородного парогенератора без смешения с балластировочной водой для четырех датчиков температуры, расположенных в 0,7 (1) и 0,94 м (2) от огневого дна на центральной оси, 0,7 м от огневого дна и 3 мм от стенки (3), 0,94 м от огневого дна и 3 мм от стенки (4).

ней стороны [22, 24, 25, 40]. Однако в этом случае происходит снижение полноты сгорания водорода [41].

Обеспечение равномерности поля температур в выхлопе водородно-кислородного парогенератора. При подаче водяного пара в проточную часть паровых турбин важным требованием к его параметрам является неравномерность температур, которая должна составлять не более 15–30 градусов по радиусу. Это обусловлено особенностями рабочих лопаток, для которых большая неравномерность температур может приводить к дополнительным термическим напряжениям и их преждевременному разрушению. При создании ВКУ как в России [18, 34, 39], так и в Германии [31, 36] удавалось получать неравномерность температур в выхлопе 7–10 градусов на установках мегаваттного уровня мощности путем смешения высокотемпературного потока с большим количеством охлаждающей воды. В качестве примера неравномерности температур в тракте водородно-кислородного парогенератора, работающего без смешения с балластировочной водой, на рис. 2 представлены температуры продуктов сгорания, полученные в нескольких точках [27].

Обеспечение смешения компонентов и высокой полноты сгорания водорода. Наличие недогоревшего водорода в генерируемом паре особенно опасно при последующем использовании этого пара в замкнутых циклах паротурбинных установок. Даже небольшое его содержание (менее 1 об. %) может приводить к образованию взрывоопасной смеси в застойных зонах элементов энергетиче-

ского оборудования, в частности в конденсаторах [42]. Из опыта ракетостроения и газотурбостроения известно, что для наиболее полного сгорания топлива необходимо обеспечить его хорошее смешение с окислителем [43]. Имеется два основных конструктивных варианта организации смешения струй топлива и окислителя:

- 1) струйные форсунки (с пересекающимися струями и сооснструйные);
- 2) центробежные форсунки.

Центробежные форсунки имеют широкий и сравнительно короткий конус распыла, при этом распыл получается более тонким, чем для струйных форсунок, поэтому они нашли наиболее широкое применение при подаче топлива или окислителя в виде жидкости, и в ВКУ, где в основном газообразные компоненты, такие форсунки не применяются.

Струйные форсунки меньше и проще центробежных, что позволяет разместить их в большем количестве на смешительном элементе. Например, в наиболее совершенном смешительном элементе Германского Центра авиации и космонавтики [14, 31, 36] размещено 58 сооснструйных форсунок в диаметре 100 мм, что существенно усложняет их конструкцию. Коэффициент расхода струйных форсунок в 2,5–3 раза больше, чем у центробежных, что обеспечивает их большую пропускную способность. Основным их недостатком является относительно большая дальность и малый угол распыла, в связи с чем для наилучшего смешения применяются пересечение струй топлива и окислителя или большая разность скоростей компонентов (в случае с сооснструйными форсунками).

Плюсом такого смешительного элемента является его надежная работа в широком диапазоне мощностей. Но в то же время для обеспечения высокой полноты сгорания водорода требуется существенное усложнение конструкции. В работе [34] показано, что при прочих равных условиях (давление, мощность, температура генерируемого пара) полнота сгорания в смешительном элементе с сооснструйными форсунками ниже, чем со струйными с пересекающимися струями водорода, на 25–40%. Кроме этого, в [44–46] показано, что при изменении соотношения содержаний и скорости подаваемых компонентов эффективность смешения и характер горения существенно изменяются.

Использование сооснструйных форсунок также целесообразно в ВКУ с камерой сгорания, обеспечивающей дополнительное перемешивание компонентов за счет вдува в зону горения балластировочного компонента [20]. Однако в этом случае может происходить существенное замедление химических реакций в зоне горения, и

вследствие этого снижается полнота сгорания водорода.

В работе [47] рассмотрен вариант смесительного элемента, в котором предусмотрена подача водорода через пористую поверхность. Отмечается хорошее смесеобразование подаваемых компонентов. Однако в данном случае водород и кислород подаются в жидком виде, что позволяет обеспечить надежное охлаждение огневого дна.

В работах [25, 27, 29, 34, 48] используются струйные форсунки с пересекающимися струями водорода и кислорода. Это обеспечивает наиболее полное перемешивание топлива и окислителя, но в камере сгорания могут возникать интенсивные вихревые потоки. При этом продукты горения высокой температуры могут попадать на огневое дно смесительного элемента, увеличивая тепловую нагрузку на него. Таким образом, выбор оптимальной геометрии смесительного элемента, обеспечивающей максимальную полноту сгорания, минимальные тепловые потоки, высокую надежность и ресурс, является актуальной задачей при разработке H_2/O_2 -парогенераторов.

Отдельное внимание можно уделить работам, связанным с изучением воспламенения водородно-кислородных смесей при различных условиях [49–52]. Важность данных работ объясняется высокой взрывоопасностью таких смесей, которые при неправильном и несвоевременном воспламенении могут приводить к взрыву и разрушению конструкции.

Теоретическое изучение полноты сгорания водорода в кислороде. Развитие современных компьютерных и вычислительных технологий позволяет проводить все более точное моделирование процессов в проточной части ВКУ. Однако на данный момент большая часть работ посвящена проведению расчетов, которые показывают общую картину протекающих процессов. Несмотря на кажущуюся простоту реакции окисления водорода кислородом, уточнение расчетных математических моделей ведется до сих пор [49, 53–57].

Первые теоретические работы по исследованию горения водорода основаны на решении общих уравнений сохранения энергии и массы [58, 59]. Более подробно процесс горения водорода в кислороде, включающий в себя 19 химических реакций, рассмотрен в работе [60]. Позже проводился более детальный расчет на их основе [61].

С ростом вычислительных мощностей компьютеров и разработкой новых расчетных программ появились работы по изучению горения водорода с их использованием [51, 62–64]. В части исследований представлены данные, полученные с использованием моделей из области ракетостроения [62, 65].

Следует отметить, что приведенные в таких работах данные полезны, но имеют ограниченное

применение из-за сильного упрощения рассматриваемых задач, которые зачастую используют двумерную ламинарную модель [56, 66–69]. В этой связи при проектировании нового оборудования ВКУ наиболее оптимальным является экспериментально-теоретическое изучение процессов.

Экспериментальное изучение полноты сгорания водорода в кислороде. Для более точного изучения полноты сгорания водорода в кислороде необходимо проведение экспериментальных исследований. Рассмотрим далее работы, посвященные изучению данного вопроса [23–27, 34, 40, 45, 70]. В [57] проводится экспериментальное доказательство модели Зельдовича для расчета горения водородно-кислородных смесей при постоянном давлении. Анализ приведенных работ позволил выделить пять наиболее важных причин, влияющих на полноту сгорания водорода: скорость охлаждения высокотемпературного пара и скорость смешения высокотемпературного пара с теплоносителем, подаваемым для охлаждения (так называемый “эффект закалки”, который заключается в резком снижении скорости химических реакций в зоне горения); тип смесительного элемента и связанная с этим интенсивность перемешивания водорода и кислорода; давление в камере сгорания.

Следует отметить, что не удалось обнаружить работы по отдельному экспериментальному изучению горения водорода в кислороде при стехиометрическом соотношении компонентов, опубликованные до 2018 г., в основном рассматривалось разбавление полученного высокотемпературного пара водой или водяным паром. Это, по всей видимости, связано с тем, что практическое применение для полученного высокотемпературного пара еще не найдено, а в разбавленном виде его предлагается использовать в качестве рабочего тела для паровых турбин.

Скорость охлаждения высокотемпературного пара в водородно-кислородных парогенераторах в наибольшей степени зависит от вида используемого теплоносителя (вода или водяной пар), а также от способа его смешения с продуктами сгорания. Сначала рассмотрим работы с разбавлением продуктов сгорания водорода и кислорода водой. Первые результаты таких исследований получены в Германии [12, 31, 36]. На рис. 3 представлена принципиальная схема водородно-кислородного парогенератора, который использовался для проведения экспериментальных исследований.

В дальнейшем подобные установки разработаны и испытаны в России [34, 38]. Основные отличия этих установок от разработанных в Германии состоят в том, что для улучшения охлаждения внутренней охлаждаемой вставки камеры сгора-

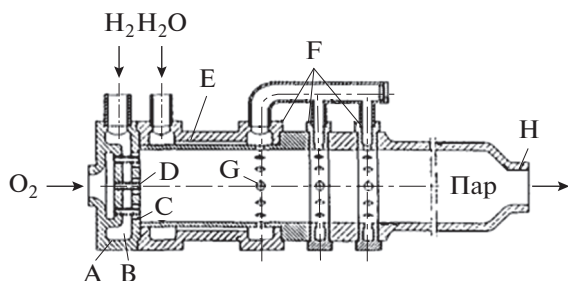


Рис. 3. Принципиальная схема водородно-кислородного парогенератора: А–D – форсунки водорода и кислорода, E – камера сгорания, F – подача воды, G – кольца с форсунками для впрыска воды, H – сопло.

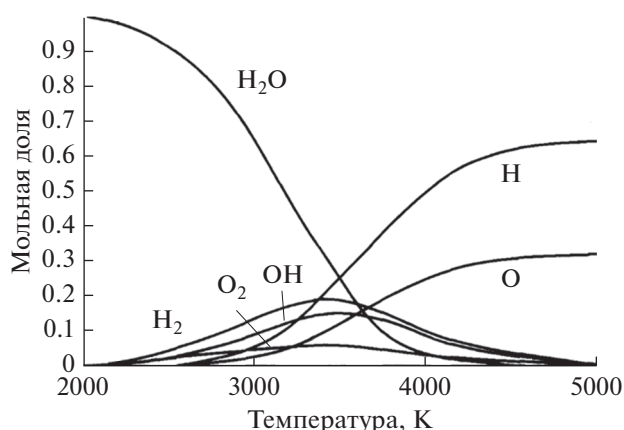


Рис. 4. Равновесное распределение мольных долей компонентов в водяном паре при давлении 0.1 МПа.

ния применялось дополнительное внутреннее пленочное охлаждение водой. Кроме этого, для улучшения смешения продуктов сгорания и охлаждающей воды на выходе из камеры сгорания использовалось суживающееся сопло.

Преимущество при использовании воды в качестве охладителя заключается в возможности обеспечения лучшего теплосъема по сравнению с водяным паром. Смешение воды с продуктами сгорания происходит на некотором удалении от смесительного элемента и осуществляется в несколько этапов (рис. 3). Это связано с так называемым “эффектом закалки” высокотемпературного парогаса. Существенное влияние этого эффекта на полноту сгорания водорода отмечено в работе [36]. Его проявление происходит в три этапа. На первом этапе возможно резкое охлаждение высокотемпературного пара вблизи относительно холодных стенок камеры сгорания, однако из-за небольшого количества высокотемпературного пара, подвергающегося такому охлаждению (около 5%), и не очень высокой скорости его охлаждения, влияние этого этапа на полноту сгорания невелико и составляет до 0.006% для водорода и до 0.04% для кислорода. Эксперименталь-

ное изучение этого этапа и его вклада в полноту сгорания осуществить очень сложно, поскольку все проведенные экспериментальные исследования проводились с добавлением к высокотемпературному пару охлаждающего теплоносителя, влияние которого намного существеннее, как будет показано далее.

На втором этапе происходит подача охлаждающего теплоносителя, массовый расход которого в несколько раз больше массового расхода высокотемпературного пара. В этом случае при слишком быстрой подаче охлаждающего теплоносителя (пара или воды), особенно непосредственно в зону горения, происходит резкое снижение скорости реакции из-за снижения концентрации активных компонентов в этой зоне. В результате чего часть компонентов и промежуточных продуктов реакции горения так и не успевает прореагировать. Влияние данного этапа наиболее наглядно можно проследить в работах, где в качестве охлаждающего теплоносителя используется водяной пар.

На третьем этапе происходит резкое охлаждение высокотемпературного пара охлаждающим теплоносителем. Вследствие того, что при высоких температурах происходит разложение воды на ее основные составляющие, температура горения в камере сгорания составляет около 3600 К. Мольные доли водорода и кислорода в таком паре максимальны. Поэтому влияние эффекта закалки на полноту сгорания водорода может быть очень велико. Для примера на рис. 4 приведены данные, представленные в работе [71] для водяного пара при давлении 0.1 МПа. Резкое охлаждение высокотемпературного потока может приводить к существенному недожогу топлива. Причину снижения полноты сгорания авторы объясняют тем, что более низкая температура воды обеспечивает более быстрый теплоотвод из зоны горения, что снижает скорость протекания реакции.

Следует отметить, что эффект закалки в сильно нагретом паре используется непосредственно при получении водорода термическим разложением воды, при котором наоборот используется резкое охлаждение и разбавление потока для получения максимального количества водорода [71, 72]. Экспериментальные исследования, проведенные в работе [71], показали, что зависимость содержания молекулярного водорода практически линейно зависит от скорости охлаждения высокотемпературного потока, а минимальная скорость охлаждения должна быть более 10^5 К/с. Таким образом, для предотвращения образования недогоревшего водорода в водородно-кислородном парогенераторе скорость охлаждения продуктов сгорания должна быть существенно ниже 10^5 К/с. Обеспечить такую скорость охлаждения при использовании воды в качестве охладителя

довольно сложно. Для этого необходимо обеспечить ее подачу в несколько этапов, при этом вода, используемая для охлаждения камеры сгорания, должна быть предварительно подогрета в ней до температуры, близкой к температуре кипения, в этом случае при ее впрыске внутрь водородно-кислородного парогенератора будет происходить частичное испарение, что снизит скорость охлаждения продуктов сгорания. Такая схема охлаждения и использовалась на всех подобных устройствах, как было показано выше.

Более низкую скорость охлаждения продуктов сгорания водорода и кислорода можно обеспечить при использовании в качестве охлаждающего компонента водяного пара. Результаты таких экспериментальных исследований представлены в работах [22, 28, 40, 70]. Существенными недостатками использования водяного пара являются более низкая эффективность охлаждения камеры сгорания и необходимость наличия самого пара требуемого давления. В результате этого в таких конструкциях в камерах сгорания практически полностью отсутствует внутренняя охлаждаемая вставка, предотвращающая попадание охлаждающего пара в зону горения. Это приводит к тому, что на полноту сгорания начинает сильно влиять второй этап эффекта закалки, что может существенно снижать полноту сгорания водорода. Вариант с использованием внутренней вставки, охлаждаемой низкотемпературным паром, может быть применим в случае наличия очень большого количества пара, к примеру на АЭС с влажнопаровыми турбинами, однако такие конструкции пока не разработаны. Экспериментальные данные о работе установок с подобной схемой подачи охлаждающего пара также отсутствуют.

Отдельно следует отметить работу [41], в которой изучение полноты сгорания водорода происходило в установке, где использовалось горелочное устройство, помещенное в воду, и горение происходило непосредственно в воде (рис. 5).

При этом изучалось влияние различных типов форсунок и диаметров горелочного устройства на полноту сгорания, однако наибольшее влияние оказывало изменение температуры воды. Например, при увеличении температуры воды от 25°C до температуры насыщения происходило снижение полноты сгорания водорода (рис. 6) [41]. Авторами подобный эффект не объясняется. Можно предположить, что при более высокой температуре воды происходит ее более интенсивное испарение и большее количество пара смешивается с продуктами сгорания. Это приводит к их большему разбавлению. Следовательно, можно рассматривать данные результаты как подтверждение сильного влияния второго этапа эффекта закалки на полноту сгорания водорода.

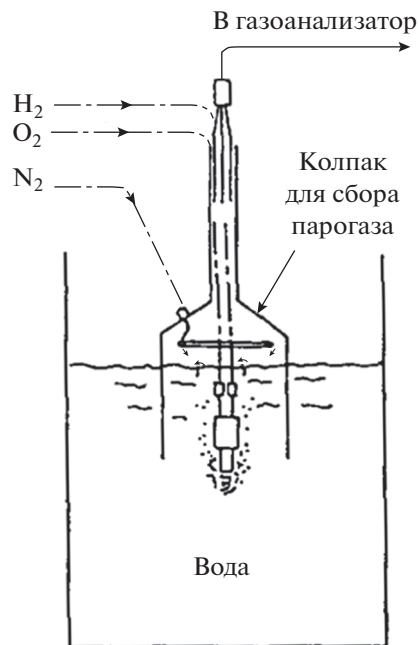


Рис. 5. Схема установки для экспериментального исследования полноты сгорания водорода в воде.

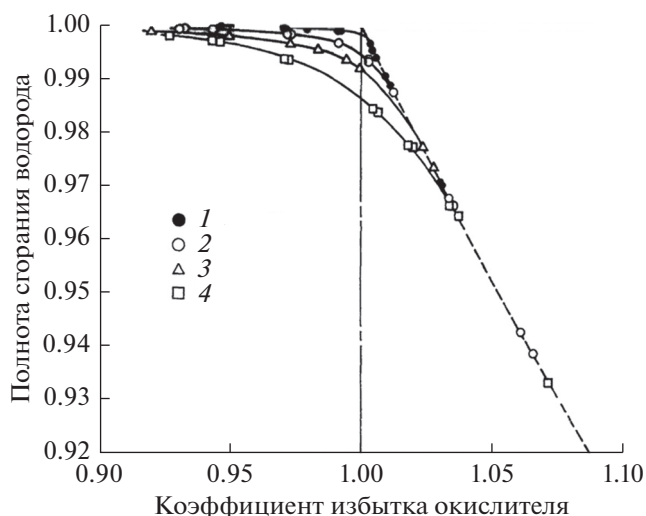


Рис. 6. Зависимость полноты сгорания водорода от коэффициента избытка окислителя при различной температуре воды в баке: 1 — 25°C, 2 — 50, 3 — 75, 4 — температура насыщения.

Непосредственное изучение полноты сгорания водорода в кислороде в зависимости от типа смесительного элемента и интенсивности перемешивания водорода и кислорода проводилось только в работах [27, 34]. В [34] проходили испытания водородного парогенератора с различными типами смесительных элементов. Первый вариант смесительного элемента со струйными форсунками водорода и кислорода обеспечивал эф-

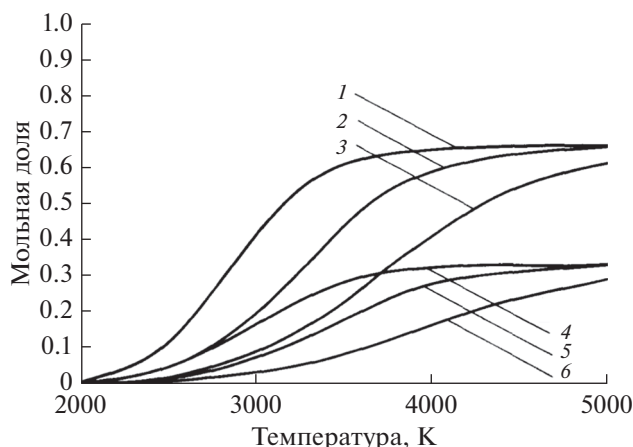


Рис. 7. Равновесное распределение мольных долей компонентов $O_2 + O$ (1–3), $H_2 + H$ (4–6) в водяном паре при давлениях: 1, 4 — 0.1 атм.; 2, 5 — 1.0; 3, 6 — 10.

эффективное смещение водорода и кислорода в камере сгорания, но при этом из-за большого угла наклона струй водорода, равного 30° , возникало образование обратных вихрей высокотемпературных продуктов на огневое дно, что приводило к его оплавлению. Во втором варианте углы наклона струй водорода уменьшены до 15° , что позволило отдалить зону горения и снизить тепловые потоки на огневое дно, однако возникновение обратных вихрей высокотемпературных продуктов реакции приводило к сильному разогреву огневого дна, что в дальнейшем могло стать причиной его разрушения. В третьем варианте были выполнены дополнительные отверстия в огневом дне для подачи водорода, в результате чего тепловое воздействие на него стало удовлетворительным. Следует отметить, что изменение угла наклона струй водорода не привело к существенному изменению полноты сгорания водорода. В четвертом варианте смесительного элемента форсунки водорода и кислорода были выполнены сооснотруйными, что позволило также существенно снизить тепловое воздействие на огневое дно. Однако в этом случае отмечается снижение полноты сгорания водорода примерно в 4–5 раз.

Увеличение давления в камере сгорания приводит к смещению кривой равновесного распределения мольных долей компонентов в водяном паре в зону более высоких температур [71] (рис. 7). Таким образом, увеличение давления позволяет снизить влияние второго и третьего этапов эффекта закалки за счет того, что при начале смешения охлаждающего теплоносителя с высокотемпературным паром концентрации водорода и кислорода в нем оказываются ниже.

Экспериментальные исследования полноты сгорания водорода в кислороде в зависимости от давления в камере сгорания проводились только

в работе [27], где показано, что при увеличении давления в камере сгорания от 1.1 до 2.5 МПа происходит существенное увеличение полноты сгорания водорода — примерно в 7 раз. Такое сильное влияние давления на полноту сгорания водорода в данном случае может быть обусловлено использованием большого количества воды для охлаждения, в результате чего это приводило к существенному влиянию всех этапов эффекта закалки.

ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВКУ В СТАЦИОНАРНОЙ И АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Дополнительные аккумулирующие надстройки для производства пиковых мощностей. Являясь универсальными и компактными устройствами, H_2/O_2 -парогенераторы позволяют реализовать разнообразные термодинамические циклы преобразования энергии с использованием современной и перспективной паротурбинной техники. При их использовании практически снимаются ограничения на температуру перегретого пара, определяемые материалами котельных агрегатов и паропроводов ($540\text{--}600^\circ\text{C}$), и оказывается возможной модернизация существующих энергоустановок, позволяющая полностью реализовать резервы мощности имеющегося оборудования, повысить КПД энергоустановок и снизить удельные расходы теплоты на выработанный киловатт-час электроэнергии. Например, турбогенераторы турбин К-160-130, К-200-130, К-300-240 и ряда других имеют запас по номинальной и максимальной мощностям $\sim 10\%$, т.е. модернизация энергоустановки с целью повышения мощности на $\sim 10\%$ за счет повышения температуры перегрева пара от 540 до 565°C и его расхода может осуществляться с минимальными затратами путем включения в схему H_2/O_2 -парогенератора как надстройки к турбине, а сама турбина и турбогенератор могут оставаться без изменений. При этом удельные расходы топлива снижаются на 1.2–1.3%. Расчетные исследования термодинамической эффективности паротурбинных энергоустановок различных типов (новых высокотемпературных и модернизируемых существующих) с H_2/O_2 -парогенераторами показывают, что эффективность использования водорода для производства электроэнергии в таких установках может превышать 60% [35, 39, 73–77].

Принцип работы дополнительной аккумулирующей надстройки с водородно-кислородным парогенератором основан на том, что продуктом сгорания водорода в кислороде при их стехиометрическом соотношении является водяной пар — рабочее тело паровых турбин, на основе которых построено большинство крупных энергетических станций. С учетом минимального времени запус-

ка водородно-кислородного парогенератора дополнительно произведенный в нем водяной пар может быть добавлен к основному расходу рабочего тела паровых турбин. Это резко увеличивает их мощность, что особенно актуально в часы пикового потребления электроэнергии. Типичная схема такой дополнительной надстройки [16] представлена на рис. 8.

При этом водород и кислород могут производиться либо за пределами самой станции, либо непосредственно на станции методом электролиза с использованием при этом ее собственной электроэнергии в часы сниженного энергопотребления.

Конечно, выбор того или иного варианта зависит от конкретных условий использования, стоимости производимого водорода и кислорода, затрат на транспортировку и т.д., однако второй вариант в большинстве случаев является более предпочтительным, поскольку исключает затраты, связанные с транспортировкой кислорода и особенно водорода.

Кроме того, в работах [75, 76, 78–80] рассматривается возможность использования водородных надстроек для повышения маневренности и эффективности ПГУ, а также повышения общей стабильности энергосетей.

Перегрев пара перед турбиной. Использование подобных схем в последнее время рассматривается для АЭС [81–84]. Следует отметить, что в европейской части России, где доля АЭС (23.2 млн кВт) и слабонадежных ТЭЦ (58 млн кВт) относительно велика, сегодня не обеспечивается требуемая маневренность генерирующих мощностей (существует одна Загорская гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС) мощностью 1200 МВт).

Важной потенциальной областью применения водородно-кислородных парогенераторов является перегрев пара перед влажнопаровыми турбинами на геотермальных электростанциях (ГеоЭС) [32, 79, 85].

Само название влажнопаровых турбин говорит о том, что они работают на влажном паре, причем их КПД (14–38%), как правило, существенно ниже, чем у турбоустановок, работающих на перегретом паре (до 52%). Вместе с тем использование влажнопаровых турбоустановок чаще всего обусловлено особенностями парогенерирующих установок, к примеру, на АЭС – это ограничение параметрами реактора, а на ГеоЭС – ограничение параметрами в геотермальной скважине. Частичным решением этой проблемы может стать использование дополнительного перегрева пара для снижения его влажности в проточной части турбины, а также на выходе из нее. В этом случае в результате снижения влажности пара в проточной части паровой турбины происходит увеличение ее внутреннего КПД, что поз-

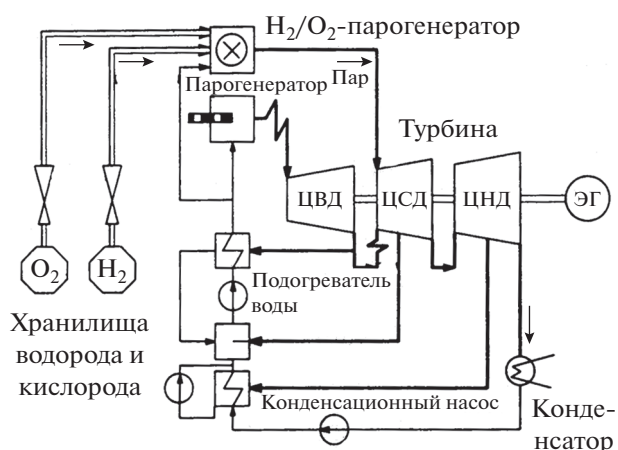


Рис. 8. Схема дополнительной аккумулирующей надстройки с водородно-кислородным парогенератором на электрической станции: ЦВД, ЦСД, ЦНД – цилиндры высокого, среднего и низкого давлений; ЭГ – электрогенератор.

воляет повысить общий (с учетом затрат на получение водорода) КПД электростанции на 3–4% при замене влажнопаровой турбины на турбину на перегретом паре [85]. Кроме этого, снижение влажности пара в проточной части турбины и особенно на выходе из нее позволит избежать преждевременного изнашивания турбинных лопаток, а следовательно, снизит затраты на капитальный ремонт, повысит надежность и уменьшит количество вынужденных остановок. Следует отметить, что в исследованных литературных источниках технико-экономической и термодинамической оценке подобных схем не уделено достаточного внимания, что связано прежде всего с отсутствием опытных образцов водородно-кислородных пароперегревающих систем, из-за чего возникают сложности при оценке их стоимости и технических характеристик. Оценка ресурса ВКУ в условиях циклического режима работы приведена в [86].

Водородные системы аккумулирования электроэнергии. В настоящее время разработки энергоэффективных накопителей электроэнергии для нужд централизованной и автономной энергетики – одно из наиболее актуальных направлений НИОКР в области перспективной энергетики за рубежом и в нашей стране.

Для крупномасштабной централизованной энергетики при уровне мощностей в десятки и сотни мегаватт основная технология сегодня – гидроаккумулирующие станции (ГАЭС), обеспечивающие высокие коэффициенты рекуперации электроэнергии (до 75%) и приемлемую стоимость электроэнергии при подходящем рельефе местности и уровне пиковых мощностей около

или более 1 ГВт. В США суммарная мощность 12 крупных ГАЭС превышает 22 ГВт.

Для уровня пиковых и маневренных мощностей в несколько мегаватт и менее и автономных потребителей в настоящее время разрабатывается широкий спектр перспективных электрохимических технологий (топливные элементы, литий-ионные, натрий-серные, ванадий-редоксные и другие аккумулирующие системы). Электрохимические аккумуляторы обычно имеют небольшой ресурс (500–1500 циклов), допустимую глубину разряда (до 30–50%) и низкую удельную энергоёмкость. Основные направления НИОКР в этой области связаны с повышением указанных характеристик.

В работах [73, 87] приведено сравнение использования водородных систем аккумулирования с другими наиболее распространёнными в настоящее время. Показано, что при определенных условиях эффективность их использования сравнима с ГАЭС.

Применение ВКУ для использования в системах автономного энергоснабжения, включая системы на основе возобновляемых источников энергии, приведено в [16, 75, 88–91].

Одна из последних схем, использующая гибридное воздушно-водородное аккумулирование энергии, показана в работе [33]. Предлагается комбинированная схема воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции, в которой для подогрева воздуха перед турбиной используется теплота сжигания водорода в кислороде, полученных путем электролиза. Водород как аккумулятор энергии обладает рядом преимуществ по сравнению с другими системами аккумулирования: высокая плотность запасаемой энергии (до 38 кВт ч/кг(т)), отсутствие вредных выбросов при работе, широкое распространение в природе. Однако основным преимуществом является очень низкая стоимость хранения энергии, которая составляет около 15\$/кВт ч, что не достижимо больше ни для одной известной системы аккумулирования. Использование водорода позволяет решить основную проблему накопителей энергии на сжатом воздухе, связанную с большими объемами хранилищ и использованием дополнительного органического топлива для подогрева, путем создания комбинированной водородно-воздушной газотурбинной системы аккумулирования. Продуктом сжигания водорода в кислороде является водяной пар высокой температуры, что позволяет использовать его для подогрева воздуха из хранилища путем смешения, исключая образование вредных веществ, в отличие, например, от сжигания водорода непосредственно в воздухе.

Другие потенциальные области использования водородно-кислородных парогенераторов. В качестве других потенциальных областей рассматри-

вается использование водородно-кислородного парогенератора для производства стерильного пара с температурой от 120 до 300°C и применения его в фармацевтической и пищевой промышленности [19]. Система парогенерации представлена в виде готового к коммерциализации образца с системой регулирования, контроля, воспламенения и безопасности. Также следует отметить турбоустановку с водородно-кислородной камерой сгорания, использующую в качестве основного рабочего тела аргон [92]. В камере сгорания происходит стехиометрическое сгорание водорода в кислороде в среде аргона (используется для охлаждения), далее полученная смесь поступает в газовую турбину, после которой попадает в конденсатор, и далее в сепараторе происходит отделение сконденсировавшейся воды от аргона, который далее сжимается в компрессоре и снова подается в камеру сгорания. Выходная мощность турбины составляет 23 кВт. Отмечается высокая сложность поддержания стехиометрического состава компонентов, однако в случае повышения концентрации в аргоне одного из компонентов добавляется недостающий компонент, и тем самым происходит регулирование. Давление на выходе их турбины поддерживалось атмосферным. Из недостатков данной конструкции следует отметить: низкий КПД турбоустановки (до 11%), потери аргона вследствие его растворения в воде, необходимость использования высокочистых компонентов – водорода и кислорода, поскольку примеси будут накапливаться, неясные характеристики конденсатора и сепаратора и отсутствие показателей по степени осушения аргона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установки на основе водородно-кислородных парогенераторов, пароперегревателей и воздушно-нагревателей, характеризующиеся высокой удельной мощностью, экологичностью и маневренностью, могут иметь широкое применение в традиционной, распределенной и автономной энергетике в диапазонах мощностей от 100 кВт до 100 МВт. В целом основные критические проблемы для успешного создания опытных образцов таких установок на данный момент решены. Удалось создать широкий модельный ряд установок различной мощности с различными типами теплоносителей, сочетающие в себе компактность, эффективное охлаждение наиболее теплонапряженных узлов и высокую полноту сгорания водорода. Тем не менее требуется проведение дальнейших дополнительных исследований для повышения их эффективности и расширения области применения.

В связи с тем, что масштабы использования водородных технологий в энергетике невелики из-за относительной дороговизны таких основ-

ных элементов, как электролизеры и системы хранения, область использования водородно-кислородных установок, подразумевающих потребление большого количества водорода, ограничена. Можно предположить, что по мере развития и удешевления этих элементов получают дополнительное развитие и водородно-кислородные установки.

В качестве главных потребителей можно выделить крупные электростанции, имеющие значительные избытки дешевой электроэнергии в часы провалов энергопотребления и нуждающиеся в выравнивании энергопотребления. Среди них следует отметить АЭС и электростанции с парогазовыми установками. Также можно отметить перспективность использования водородно-кислородных установок в автономных системах энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии. В данном случае ключевую роль будут играть такие параметры, как отсутствие потерь при длительном хранении энергии и наличие тепла как побочного продукта при производстве электроэнергии, необходимого для теплоснабжения автономного потребителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 05.607.21.0313 (уникальный идентификатор RFMEFI60719X0313).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Future of Hydrogen. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. Paris, 2019.
2. Асланян Г.С., Реутов Б.Ф. Проблематичность становления водородной энергетики // Теплоэнергетика. 2006. Т. 4. С. 66.
3. Стырикович М.А., Легасов В.А., Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П. Основные проблемы водородной энергетики // Предварительный доклад Комиссии АН СССР по водородной энергетике. М.: ИВТАН, 1978.
4. Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П. Некоторые аспекты развития водородной энергетики и технологии // Теплоэнергетика. 1980. Т. 3. С. 8.
5. Gorlov A.M. Hydrogen as an Activating Fuel for a Tidal Power Plant // Int. J. Hydrogen Energy. 1981. Т. 6. № 3. С. 243.
6. Шпильрайн Э.Э., Сарумов Ю.А., Попель О.С. Применение водорода в энергетике и энергетических комплексах // Атомно-водородная энергетика и технология. Вып. 4. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 5.
7. Peschka W., Winter C.J. The Secondary Energy Carrier Hydrogen Review of DFVLR-activities // Int. J. Hydrogen Energy. 1984. Т. 9. № 4. С. 319.
8. Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г. Введение в водородную энергетику. М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. Peschka W. Hydrogen Combustion in Tomorrow's Energy Technology // Int. J. Hydrogen Energy. 1987. Т. 12. № 7. С. 481.
10. De Miranda P.E.V. Ch. 5.3.2 – Application of Hydrogen Combustion for Electrical and Motive Power Generation // Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies. Acad. Press, 2019. С. 259.
11. Sternfeld H.J., Heinrich P. A Demonstration Plant for the Hydrogen/Oxygen Spinning Reserve // Int. J. Hydrogen Energy. 1989. Т. 14. № 10. С. 703.
12. Beer S., Haidn O., Willms H. Control of Stoichiometric Propellant Supply in a H₂/O₂ Spinning Reserve System // 1st Int. Conf. on Combustion Technologies for a Clean Environment. 3–6 Sept. 1991. Villamoura, Portugal, 1991.
13. Sternfeld H.J. Capacity Control of Power Stations by O₂H₂ Rocket Combustor Technology // Acta Astronautica. 1995. Т. 37. С. 11.
14. Sternfeld H.J., Haidn O.J., Potier B., Vuillemoz P., Popp M. International Cooperation on Hydrogen-oxygen High Pressure Combustion // Acta Astronautica. 1995. Т. 37. С. 487.
15. Бебелин И.Н., Волков А.Г., Грязнов А.Н., Малышенко С.П. Разработка и исследование экспериментального водородно-кислородного парогенератора мощностью 10 МВт(т) // Теплоэнергетика. 1997. № 8. С. 48.
16. Малышенко С.П. Водород как аккумулятор энергии в электроэнергетике // Рос. хим. журн. 1997. Т. 41. С. 112.
17. Pekhota F.N., Rusanov V.D., Malysenko S.P. Russian Federal Hydrogen Energy Program // Int. J. Hydrogen Energy. 1998. Т. 23. № 10. С. 967.
18. Malysenko S.P., Gryaznov A.N., Filatov N.I. High-pressure H₂/O₂-steam Generators and Their Possible Applications // Int. J. Hydrogen Energy. 2004. Т. 29. № 6. С. 589.
19. Sternfeld H.J., Paulus M. Hydrogen/Oxygen Steam Generators for Sterilization Processes and Chemical Engineering // Int. J. Hydrogen Energy. 1993. Т. 18. № 11. С. 945.
20. Hashimoto T., Koyama K., Yamagishi M. Hydrogen Combustion Characteristics in a Model Burner with a Coaxial Injector // Int. J. Hydrogen Energy. 1998. Т. 23. № 8. С. 713.
21. Hijikata T. Research and Development of International Clean Energy Network Using Hydrogen Energy (WE-NET) // Int. J. Hydrogen Energy. 2002. Т. 27. № 2. С. 115.
22. Ильичев В.А., Пригожин В.И., Савич А.Р., Лешов А.Н., Малышенко С.П. Экспериментальные исследования рабочих процессов водородных высокотемпературных мини-парогенераторов с вихревыми камерами сгорания // Альтернативная энергетика и экология. 2009. Т. 76. № 8. С. 72.
23. Ильичев В.А., Пригожин В.И., Савич А.Р., Дроздов И.Г., Пригожин А.А. Экспериментальные исследования рабочих процессов модельной водородной высокотемпературной паротурбинной энергоустановки // Вестн. ВГТУ. 2010. Т. 6. № 8. С. 11.

24. Гурьянов А.И., Пиралишвили Г.Ш., Верещагин И.М. Теплофизика водород-кислородных камер сгорания высокотемпературных турбин комбинированных ПГУ // Вестн. Самарск. гос. аэрокосм. ун-та им. С.П. Королёва (нац. иссл. ун-та). 2011. Т. 27. № 3–2. С. 137.
25. Ильичев В.А., Пригожин В.И., Савич А.Р., Свиридов О.П., Малышенко С.П., Назарова О.В., Счастливцев А.И. Разработка высокотемпературного водородного минипароперегревателя // Тепловые процессы в технике. 2011. Т. 11. С. 517.
26. Geiji R., Sane A., Sircar I., Rankin B., Meyer S., Gore J. An Experimental Study of a H₂–O₂ Flame Based Superheated Steam Generator for Coal Gasification // 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2012. Paper
<https://doi.org/10.2514/6.2012-521>.
27. Борзенко В.И., Счастливцев А.И. Эффективность генерации пара в водородно-кислородном парогенераторе киловаттного класса мощности // ТВТ. 2018. Т. 56. № 6. С. 1011.
28. Гурьянов А.И., Пиралишвили Г.Ш. Высокотемпературный перегрев водяного пара в вихревых водород-кислородных пароперегревателях // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 11. С. 17.
29. Schastlivtsev A., Dunikov D., Borzenko V. Experimental Study of the Processes in Hydrogen-Oxygen Gas Generator // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. Т. 44. № 18. С. 9450.
30. Cicconardi S.P., Perna A., Spazzafumo G. Steam Powerplants Fed by High Pressure Electrolytic Hydrogen // Int. J. Hydrogen Energy. 2004. Т. 29. № 5. С. 547.
31. Fröhlke K., Haidn O.J. Spinning Reserve System Based on H₂/O₂ Combustion // Energy Convers. Manag. 1997. Т. 38. № 10. С. 983.
32. Dunikov D.O. Cycle Improvement and Hydrogen Steam Superheating at Mutnovsky Geothermal Power Plant // Case Studies in Thermal Engineering. 2018. Т. 12. С. 736.
33. Schastlivtsev A.I., Nazarova O.V. Hydrogen–Air Energy Storage Gas-turbine System // Therm. Eng. (Engl. transl. Teploenergetika). 2016. Т. 63. № 2. С. 107.
34. Малышенко С.П., Пригожин В.И., Савич А.Р., Счастливцев А.И., Ильичев В.А., Назарова О.В. Эффективность генерации пара в водородокислородных парогенераторах мегаваттного класса мощности // ТВТ. 2012. Т. 50. № 6. С. 765.
35. Малышенко С.П., Пригожин В.И. Разработка и создание водородо-кислородных парогенераторов для энергетики // Инновационные технологии в энергетике / Бударгин О.М., Малышенко С.П. М.: Наука, 2012. С. 162.
36. Haidn O.J., Fröhlke K., Carl J., Weingartner S. Improved Combustion Efficiency of a H₂O₂ Steam Generator for Spinning Reserve Application // Int. J. Hydrogen Energy. 1998. Т. 23. № 6. С. 491.
37. Shternfeld H.J., Wolfmuller K. The Hydrogen/Oxygen Spinning Reserve Ssystem – an Approach to the Economic Generation of Electricity from Hydrogen // VGB Kraftwerkstechnik. 1986. № 66. С. 675.
38. Bebelin I.N., Volkov A.G., Gryaznov A.N., Malysenko S.P. Development and Investigation of an Experimental Hydrogen-oxygen Steam Generator of 10-MW Thermal Capacity // Therm. Eng. 1997. Т. 44. № 8. С. 657.
39. Малышенко С.П., Пригожин В.И., Рачук В.С. Водородо-кислородные парогенераторы // Современное машиностроение. 2009. Т. 2–3. С. 54.
40. Прибатурин Н.А., Федоров В.А., Алексеев М.В., Сорочкин А.Л. Изучение горения водород-кислородной смеси в потоке водяного пара низкой температуры // Тепловые процессы в технике. 2012. № 6. С. 261.
41. Kutakura T., Kan S., Hiraoka K., Ikame M. Characteristics of Stoichiometric H₂–O₂ Combustion in Water with Premixing and Diffusion Burners // Int. J. Hydrogen Energy. 1996. Т. 21. № 8. С. 685.
42. Мильман О.О., Федоров В.А., Карпушин А.Г., Лошкарева Е.А. Взрывоопасность водорода при низких давлениях в конденсаторах энергоустановок // Альтернативная энергетика и экология. 2013. Т. 6–1. № 127. С. 17.
43. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 488 с.
44. GuoBiao C., Jian D., Yang Z., NanJia Y. Combustion Behaviors of GO₂/GH₂ Swirl-coaxial Injector Using Non-intrusive Optical Diagnostics // Acta Astronautica. 2016. Т. 123. С. 246.
45. Jin P., Li M., Cai G. Experimental Study of Hydrogen-rich/Oxygen-rich Gas–Gas Injectors // Chin. J. Aeronautics. 2013. Т. 26. № 5. С. 1164.
46. Wang X., Cai G., Huo H. Numerical Study of High-pressure GO₂/GH₂ Combustion of a Single-Element Injector // Sci. China Technol. Sci. 2012. Т. 55. № 10. С. 2757.
47. Lux J., Suslov D., Haidn O. On Porous Liquid Propellant Rocket Engine Injectors // Aerospace Sci. Technol. 2008. Т. 12. № 6. С. 469.
48. Schastlivtsev A., Dunikov D., Borzenko V. Experimental Study of the Processes in Hydrogen-oxygen Gas Generator // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Т. 44. № 18. С. 9450.
49. Забайкин В.А. Горение водорода в условиях высокотемпературного сверхзвукового потока // ТВТ. 2017. Т. 55. № 4. С. 582.
50. Попов Н.А. Влияние неравновесного возбуждения на воспламенение водород-кислородных смесей // ТВТ. 2007. Т. 45. № 2. С. 296.
51. Смехов Г.Д., Ибрагимова Л.Б., Каркач С.П., Скребков О.В. Численное моделирование воспламенения водородо-кислородной смеси с учетом электронно-возбужденных компонентов // ТВТ. 2007. Т. 45. № 3. С. 440.
52. Смехов Г.Д., Шаталов О.П. Исследование воспламенения водородно-кислородных смесей в диапазоне температур 700–2500 К // ТВТ. 2016. Т. 54. № 1. С. 81.

53. *Konnov A.A.* Yet Another Kinetic Mechanism for Hydrogen Combustion // *Combust. Flame*. 2019. Т. 203. С. 14.
54. *Grosseuvres R., Comandini A., Bentaib A., Chaumeix N.* Combustion Properties of H₂/N₂/O₂/Steam Mixtures // *Proc. Combust. Inst.* 2019. Т. 37. № 2. С. 1537.
55. *Аминов П.З., Егоров А.Н.* Исследование процессов сгорания водорода в кислородной среде // *ТВТ*. 2018. Т. 56. № 5. С. 821.
56. *Wang B., Wei W., Ma S., Wei G.* Construction of One-step H₂/O₂ Reaction Mechanism for Predicting Ignition and Its Application in Simulation of Supersonic Combustion // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2016. Т. 41. № 42. С. 19191.
57. *Frolov S.M., Aksenov V.S., Ivanov V.S.* Experimental Proof of Zel'dovich Cycle Efficiency Gain over Cycle with Constant Pressure Combustion for Hydrogen–oxygen Fuel Mixture // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2015. Т. 40. № 21. С. 6970.
58. *Maas U., Warnatz J.* Ignition Processes in Hydrogen–oxygen Mixtures // *Combust. Flame*. 1988. Т. 74. № 1. С. 53.
59. *Das L.M.* Hydrogen–oxygen Reaction Mechanism and Its Implication to Hydrogen Engine Combustion // *Int. J. Hydrogen Energy*. 1996. Т. 21. № 8. С. 703.
60. *Li J., Zhao Z., Kazakov A., Dryer F.* An Updated Comprehensive Kinetic Model of Hydrogen Combustion // *Int. J. Chem. Kinetics*. 2004. № 36. P. 566.
61. *Konnov A.A.* Remaining Uncertainties in the Kinetic Mechanism of Hydrogen Combustion // *Combust. Flame*. 2008. Т. 152. № 4. С. 507.
62. *Smith J.J., Schneider G., Suslov D., Oschwald M., Haidn O.* Steady-state High Pressure LO_x/H₂ Rocket Engine Combustion // *Aerospace Sci. Technol.* 2007. Т. 11. № 1. С. 39.
63. *Гурьянов А.И., Пиралишвили Г.Ш., Верещагин И.М.* Теплообмен и горение в водород–кислородной камере сгорания // *Вестн. Рыбинск. гос. авиац. технол. акад. им. П.А. Соловьева*. 2011. Т. 3. № 21. С. 3.
64. *Shanthanu S., Raghuram S., Raghavan V.* Transient Evaporation of Moving Water Droplets in Steam–Hydrogen–Air Environment // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2013. Т. 64. С. 536.
65. *Betelin V.B., Shagaliev R.M., Aksenov S.V., Belyakov I.M., Deryuguin Y.N., Korchazhkin D.A., Kozelkov A.S., Nikitin V.F., Sarazov A.V., Zelenskiy D.K.* Mathematical Simulation of Hydrogen–Oxygen Combustion in Rocket Engines Using LOGOS Code // *Acta Astronautica*. 2014. Т. 96. С. 53.
66. *Cutrono Rakhimov A., Visser D.C., Holler T., Komen E.M.J.* The Role of CFD Combustion Modelling in Hydrogen Safety Management. VI: Validation for Slow Deflagration in Homogeneous Hydrogen–air–steam Experiments // *Nucl. Eng. Des.* 2017. Т. 311. С. 142.
67. *Pan J.F., Wu D., Liu Y.X., Zhang H.F., Tang A.K., Xue H.* Hydrogen/Oxygen Premixed Combustion Characteristics in Micro Porous Media Combustor // *Appl. Energy*. 2015. Т. 160. С. 802.
68. *Smirnov N.N., Nikitin V.F.* Modeling and Simulation of Hydrogen Combustion in Engines // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2014. Т. 39. № 2. С. 1122.
69. *Sánchez A.L., Williams F.A.* Recent Advances in Understanding of Flammability Characteristics of Hydrogen // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2014. Т. 41. С. 1.
70. *Stathopoulos P., Schimek S., Tanneberger T., Paschereit C.* Blue Combustion: Stoichiometric Hydrogen–Oxygen Combustion Under Humidified Conditions // *ASME Turbo Expo*. 2015. Paper. <https://doi.org/10.1115/GT2015-43149>
71. *Lédé J., Lopicque F., Villermaux J.* Production of Hydrogen by Direct Thermal Decomposition of Water // *Int. J. Hydrogen Energy*. 1983. Т. 8. № 9. С. 675.
72. *Ihara S.* Feasibility of Hydrogen Production by Direct Water Splitting at High Temperature // *Int. J. Hydrogen Energy*. 1978. Т. 3. № 3. С. 287.
73. *Мальшенко С.П., Счастливец А.И.* Анализ системы водородного аккумулирования электроэнергии в сравнении с другими системами аккумулирования // *ТВТ*. 2015. Т. 53. № 4. С. 538.
74. *Schastlivtsev A., Malysenko S.* Process Investigations and Scheme Analysis of Hydrogen Steam Turbine Energy Storage System // *20th World Hydrogen Energy Conf. WHEC*. 2014. Т. 2. С. 900.
75. *Haidn O., Davidenko D., Gökalp I.* Clean Smart Grid – Primary Frequency Control Applying Rocket Combustor Technology // *7th Int. Energy Conversion Engineering Conf.* 2010. Paper <https://doi.org/10.2514/6.2009-4569>.
76. *Haidn O.* Clean Primary Frequency Control for Turkish Transmission Grid Applying Rocket Combustor Technology // *Conf. Workshop Item*. 2010. Paper 12.1452/6.2010-2451.
77. *Клименко А.В., Мильман О.О., Шифрин Б.А.* Высокотемпературная газопаротурбинная установка на базе комбинированного топлива // *Теплоэнергетика*. 2015. Т. 11. С. 43.
78. *Шаниро В.И., Мальшенко С.П., Реутов Б.Ф.* Повышение маневренности ПГУ при использовании водородно–кислородных парогенераторов // *Теплоэнергетика*. 2011. № 9. С. 35.
79. *Schastlivtsev A.I., Borzenko V.I.* Hydrogen–oxygen Steam Generator Applications for Increasing the Efficiency, Maneuverability and Reliability of Power Production // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. Т. 891. № 1. С. 012213.
80. *Stathopoulos P., Sleem T., Paschereit C.* Steam Generation with Stoichiometric Combustion of H₂/O₂ as a Way to Simultaneously Provide Primary Control Reserve and Energy Storage // *Appl. Energy*. 2017. V. 205. P. 692.
81. *Aminov R.Z., Egorov A.N.* Hydrogen-oxygen Steam Generator for a Closed Hydrogen Combustion Cycle // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019. Т. 44. № 21. С. 11161.
82. *Aminov R.Z., Yurin V.E.* Nuclear Power Plant Safety Improvement Based on Hydrogen Technologies // *Nucl. Energy Technol.* 2015. Т. 1. № 1. С. 77.
83. *Аминов П.З., Байрамов А.Н., Шацкова О.В.* Оценка эффективности водородных циклов на базе внепи-

- ковой электроэнергии АЭС // Теплоэнергетика. 2009. № 11. С. 41.
84. Аминов П.З., Гудым А.А. Уравнения для промышленных расчетов термодинамических свойств высокотемпературного диссоциированного водяного пара // ТВТ. 2019. Т. 57. № 3. С. 383.
85. *Malyshenko S.P., Schastlivtsev A.I.* Thermodynamic Efficiency of Geothermal Power Stations with Hydrogen Steam Superheating // Therm. Eng. (Engl. transl. Теплоэнергетика). 2010. Т. 57. № 11. С. 931.
86. *Егоров А.Н.* Оценка ресурса водород-кислородного парогенератора в условиях циклического режима работы // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 1. С. 35.
87. *Stewart D., Saur G., Penev M.* Lifecycle Cost Analysis of Hydrogen Versus Other Technologies for Electrical Energy Storage // Book Lifecycle Cost Analysis of Hydrogen Versus other Technologies for Electrical Energy Storage. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2009. С. 59.
88. *Alabbadi S.A.* Hydrogen Oxygen Steam Generator Integrating with Renewable Energy Resource for Electricity Generation // Energy Proc. 2012. Т. 29. С. 12.
89. *Gray E.M., Webb C.J., Andrews J., Shabani B., Tsai P.J., Chan S.L. I.* Hydrogen Storage for Off-grid Power Supply // Int. J. Hydrogen Energy. 2011. Т. 36. № 1. С. 654.
90. *Meurer C., Barthels H., Brocke W.A., Emonts B., Groehn H.G.* PHOEBUS – an Autonomous Supply System with Renewable Energy: Six Years of Operational Experience and Advanced Concepts // Solar Energy. 1999. Т. 67. № 1–3. С. 131.
91. *Sugisita H., Mori H., Uematsu K.* A Study of Thermodynamic Cycle and System Configurations of Hydrogen Combustion Turbines // Int. J. Hydrogen Energy. 1998. Т. 23. № 8. С. 705.
92. *Kato S., Nomura N.* Hydrogen Gas-turbine Characteristics and Hydrogen Energy System Schemes // Energy Convers. Manag. 1997. Т. 38. № 10. С. 1319.