



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ КИЛОВАТТНОГО КЛАССА МОЩНОСТИ

А.И. Счастливцев, И.М. Молотов, В.И. Борзенко

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия
h2lab@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Проведение экспериментальных исследований водородно-кислородного парогенератора киловаттного класса мощности (ВКП) для изучения процессов тепло- и массопереноса. *МЕТОДЫ.* На первом этапе была рассмотрена технологическая система диагностики и управления ВКП, с помощью которой прошли предварительные экспериментальные исследования, по результатам которых были модернизированы его основные конструктивные элементы. Далее, на втором этапе, была создана автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП), что обеспечило проведение многорежимных экспериментальных исследований ВКП. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Конструкция ВКП показала свою работоспособность. Приведены изменение расхода охлаждающей воды, давлений и температуры в камере испарения во время многорежимных испытаний, так же показаны обобщенные результаты проведенных экспериментальных исследований, где представлена зависимость температуры пара от массовой доли воды при различных коэффициентах избытка окислителя. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В ходе предварительных экспериментальных исследований была проведена разработка модернизированных узлов ВКП, обеспечивающих повышение эффективности его работы. Созданная АСУ ТП позволила успешно провести последующие многорежимные экспериментальные исследования с двумя различными типами камер сгорания. Показатели непрореагировавшего водорода сравнимы с уже достигнутыми в существующих аппаратах. Характерные времена перехода с режима на режим показывают соответствие требованиям для создания автономных энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: водород; сжигание водорода; водородно-кислородный парогенератор; автоматизация; АСУ ТП; АСНИ.

Для цитирования: Счастливцев А.И., Молотов И.М., Борзенко В.И. Исследование тепловых процессов в водородно-кислородных парогенераторах киловаттного класса мощности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 2. С.116-127. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-116-127.

INVESTIGATION OF THERMAL PROCESSES IN HYDROGEN-OXYGEN STEAM GENERATORS OF KILOWATT POWER CLASS

AI. Schastlivtsev, IM. Molotov, VI. Borzenko

Joint Institute of High Temperatures of RAS
h2lab@mail.ru

Abstract: *PURPOSE.* Testing of a hydrogen-oxygen steam generator (HOSG) of the kilowatt power class for the study of heat and mass transfer processes. *METHODS.* At the first stage, the technological system of diagnostics and control was considered, with the help of which preliminary tests were carried out. According to the results of which the structural elements of the HOSG were modernized. Further, at the second stage, an automated process control system was created, which ensured the conduct of multi-mode tests of the HOSG. *RESULTS.* The design of the HOSG showed its efficiency. The changes in the cooling water flow rate, pressure and temperature in the evaporation chamber during multi-mode tests are presented, as well as the generalized results of experimental studies, which show the dependence of the steam temperature on the mass fraction of water at different coefficients of the excess oxidizer.

CONCLUSION. During the preliminary tests, the development of upgraded components of the HOSG was carried out, ensuring an increase in the efficiency of its operation. The created automated control system made it possible to successfully conduct subsequent multi-mode tests with two different types of cameras. The indicators of unreacted hydrogen are comparable to those already achieved in existing devices. The characteristic transition times from mode to mode show compliance with the requirements for creating autonomous power plants based on renewable energy sources.

Keywords: *hydrogen; hydrogen combustion; hydrogen-oxygen steam generator; automation; automated process control system.*

For citation: Schastlivtsev AI., Molotov IM., Borzenko VI. Investigation of thermal processes in hydrogen-oxygen steam generators of kilowatt power class. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23(2):116-127. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-116-127.

Введение и литературный обзор

Водород в значительной степени рассматривается как потенциальный чистый промежуточный энергоноситель для будущей экономики [1] благодаря доказанному факту, что он является: самым распространенным элементом во Вселенной (составляет более 90% всех атомов), самым легким элементом (молекулярная масса = 2,016) с самым высоким известным содержанием энергии на единицу массы по сравнению с другими видами топлива, нетоксичным и, в отличие от нефти, природного газа или угля, он является экологически чистым энергоносителем. Водород может вырабатываться как из возобновляемых источников, таких как гидроэнергия, ветер, волна, солнечная энергия, биомасса и геотермальные источники энергии, так и из невозобновляемых, таких как уголь, природный газ и ядерные источники энергии.

Водородно-кислородные парогенераторы позволяют производить высокотемпературный пар посредством стехиометрического сжигания водорода в кислороде [2-4]. Метод сжигания водорода в кислороде при высоких давлениях с целью получения высокотемпературного водяного пара, реализуемый в водородно-кислородных парогенераторах, позволяет создавать установки с высокой удельной мощностью и отсутствием 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 [5-9].

В соответствии с энергетической стратегией РФ до 2030 г. потребность в маневренных и пиковых мощностях энергосистемы в РФ к 2030 г. может составлять до 10 ГВт, а при планируемом развитии возобновляемой энергетики общая мощность установок на основе возобновляемых источников энергии будет составлять от 6 до 9 ГВт, что потребует соответствующего создания систем аккумулирования энергии. И в том, и в другом направлении для решения этих задач возможно использование водородно-кислородных парогенераторов.

В установках киловаттного уровня мощности существенно возрастают удельные тепловые нагрузки на стенки камеры сгорания (КС) и существенно ограничен расход воды, подаваемой на ее охлаждение. Для повышения тепловой эффективности ВКП и его камеры сгорания вода, поступающая на охлаждение внутренней стенки КС используется в дальнейшем для снижения температуры продуктов сгорания с 3300...3700 К до 800...1500 К, необходимой для потребителя. В результате общие тепловые потери при работе парогенератора на основном режиме не превышают 0,1...0,3 %. Однако, при реализации такой схемы охлаждения КС, возникает жесткое ограничение на расход охлаждающей воды, при этом чем выше температура пара нужна потребителю, тем меньше должен быть расход воды на охлаждение. В результате одной из основных проблем при создании парогенератора киловаттного уровня мощности является разработка конструкции КС, способной надежно работать в заданных условиях. Это требует поиска ее оптимальной конструкции: с внешним охлаждением внутренней стенки, комбинированным водородно-водяным охлаждением, создание вихревых КС и т.д.;

Для повышения эффективности и безопасности работы ВКП требуется обеспечить полноту сгорания водорода в кислороде близкую к 100 %, при стехиометрическом соотношении компонентов. Согласно методам проектирования жидкостных ракетных двигателей, для определения объема КС, необходимого для эффективного сгорания

горючего, используется т.н. приведенная (или характеристическая) длина камеры сгорания, которая может быть определена по следующей формуле

$$l_{пр} = \frac{V_k \cdot p_k \cdot A(\gamma)}{G_k \cdot \sqrt{R_k \cdot T_k}}$$

где V_k - объем КС [м³], p_k - давление в КС [Па], G_k - расход компонентов в КС [кг/сек], R_k - универсальная газовая постоянная [Дж/(моль·К)], T_k - температура продуктов в КС [К].

Значения $l_{пр}$ зависят от вида применяемого топлива и определяются экспериментально, в частности для смеси водород-кислород эта величина составляет 0,25...1 м [17]. Следует отметить, что смещению в область меньших значений $l_{пр}$ способствует более интенсивное смешение подаваемых компонентов, повышение давления и температуры в КС и использование предварительной газификации или подогрева компонентов. Из формулы (1) видно, что для увеличения приведенной длины КС необходимо либо увеличивать ее объем, либо давление продуктов сгорания, поскольку все остальные параметры являются либо постоянными, либо ограничены конструкцией. Таким образом, одной из основных задач, при создании эффективного водородного парогенератора, является разработка оптимизированных конструкций камеры сгорания и смесительного элемента (СЭ);

Пар на выходе из ВКП должен иметь неравномерность температур не более 15...25 К. Как было отмечено выше, в H₂/O₂ - парогенераторе для охлаждения продуктов сгорания до требуемой температуры используется охлаждающая вода из системы внешнего охлаждения КС, расход которой ограничен требуемыми параметрами пара на выходе. Для обеспечения равномерной температуры генерируемого пара необходимо обеспечить интенсивное смешение охлаждающей воды с продуктами сгорания. В частности, это может быть достигнуто за счет использования резкого расширения продуктов сгорания в камере испарения. В этом случае необходимо разработать такую компоновку камеры испарения, которая обеспечит выполнение заданных условий.

Для решения рассмотренных задач проведены экспериментальные исследования тепловых процессов в экспериментальном водородно-кислородном парогенераторе, основными целями которых являются:

- исследование полноты сгорания в интервале требуемых давлений и температур;
- исследование неравномерности поля температур;
- разработка модернизированных узлов, проведение их испытаний и исследований тепловых процессов в ВКП.

Материалы и методы

Экспериментальный образец водородно-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт (ВКП), предназначенный для испытания на газообразном кислороде и водороде, состоит из трех основных узлов (рис. 1.): смесительного элемента с запальным устройством, камеры сгорания и камеры испарения.



Рис. 1. Конструктивная схема экспериментального образца водородно-кислородного парогенератора

Fig. 1. Design diagram of an experimental sample of a hydrogen-oxygen steam generator

Смесительный элемент с запальным устройством в ВКП предназначен для смешения основных расходов водорода и кислорода, подаваемых в камеру сгорания. Для воспламенения смеси используется электросвеча СПН-4-3Т. Подача газообразных компонентов топлива в парогенератор осуществляется следующим образом: газообразный кислород подается в свечной блок, где во время работы свечи происходит его частичная ионизация и нагрев от искрового разряда. Из свечного блока кислород вдувается в камеру сгорания через центральное отверстие форсунки. Газообразный водород подается через входной штуцер смесительного элемента в основной коллектор водорода и далее через форсунки диаметром 0,5 мм подается в камеру сгорания и смешивается с ионизированным кислородом, в результате происходит воспламенение смеси.

Камера сгорания в ВКП имеет внешнее водяное охлаждение и состоит из внешнего стального корпуса и внутренней охлаждаемой бронзовой вставки с внешним оребрением для повышения коэффициента теплоотдачи. Охлаждающим компонентом является вода. Основным отличием камер сгорания ВКП мегаваттного класса мощности и ВКП

киловаттного класса является то, что в последнем случае весь расход балластировочной жидкости впрыскивался в камеру испарения в одном сечении. Это сечение является выходным сечением для камеры сгорания и входным сечением для камеры испарения. Длина и диаметр КС в опытах составляют от 30 до 75 мм и от 20 до 40 мм соответственно.

Камера испарения представляет собой неохлаждаемый толстостенный цилиндрический канал внутренним диаметром от 20 до 50 мм и длиной 100 мм. В ВКП, как отмечалось выше, полный расход охлаждающей воды проходит через КС и смешивается с продуктами сгорания на выходе из нее. Это обусловлено тем, что при таких незначительных расходах воды (от 12 до 27 г/сек) сложно обеспечить ее интенсивное перемешивание с продуктами сгорания для получения равномерности температур на выходе не более 15 градусов. Поэтому проводилась серия экспериментальных исследований с различными конструкциями КИ для изучения равномерности поля температур генерируемого пара на выходе и обеспечения полноты сгорания.

Установка ВКП на экспериментальном стенде осуществлялась согласно схеме показанной на рис. 2. Водород и кислород поступают из газовых баллонов при давлении до 150 атм. Регулирование расхода происходило на первом этапе исследований путем смены настроечных шайб и изменением давления наддува. Для проведения многорежимных испытаний на втором этапе исследований были установлены регуляторы расхода, обеспечивающие подачу стехиометрического соотношения компонентов в диапазоне мощностей от 10 до 220 кВт (т). Циклограмма проведения работ представлена на рис. 3.

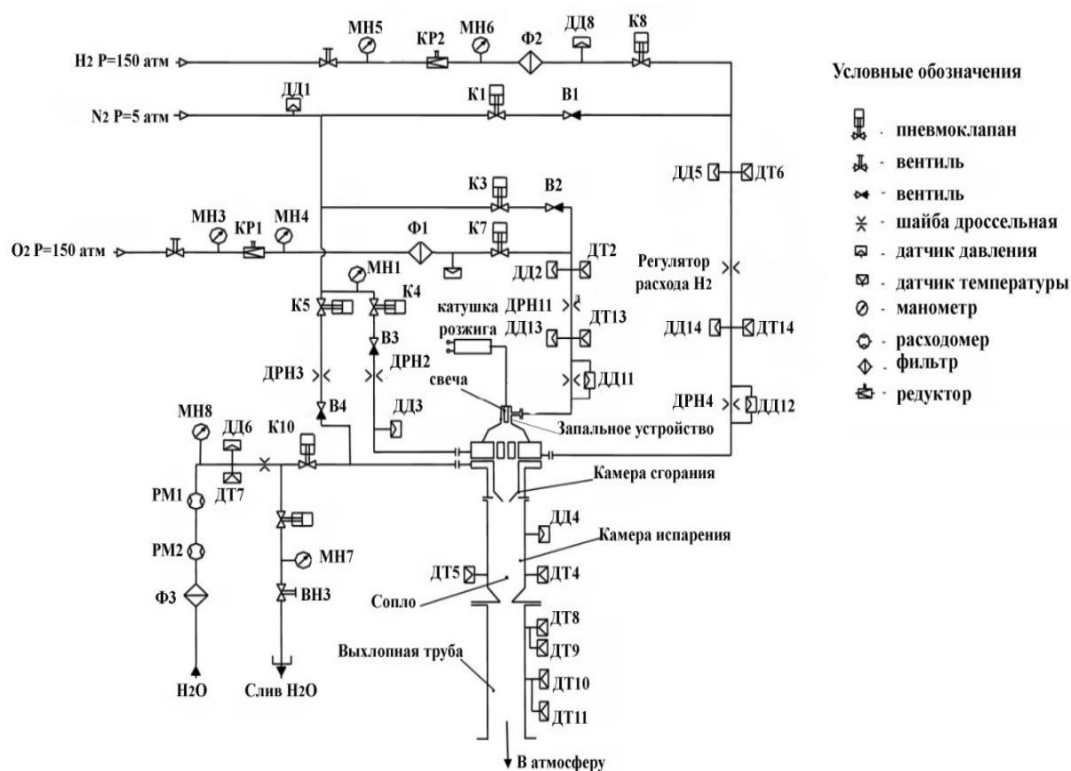


Рис. 2. Схема подключения ВКП на экспериментальном стенде
Fig. 2. Connection diagram of the VCP on the experimental stand

Исследование полноты сгорания является важной научно-технической задачей, поскольку именно от этого параметра в большей степени зависит эффективность водородно-кислородного парогенератора и безопасность его работы. На первом этапе исследование полноты сгорания в ВКП осуществлялось путем термодинамического анализа экспериментальных данных. Исходными параметрами для анализа являлись следующие:

- температура пара на выходе из КИ;
- давление пара в КИ;
- температура и давление подаваемых компонентов: водорода, кислорода и воды;
- расходы подаваемых компонентов: водорода, кислорода и воды.

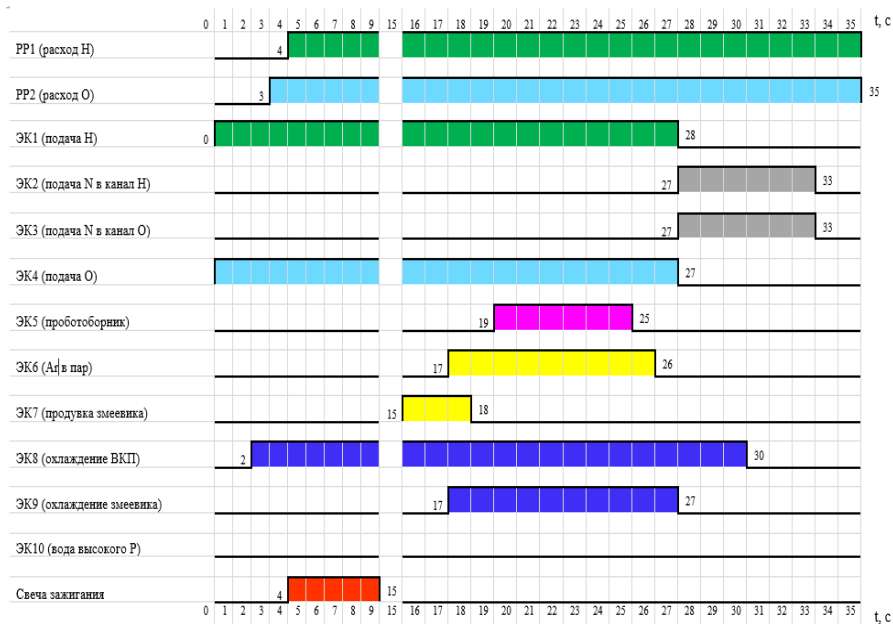


Рис.3 Пример циклограммы эксперимента
Fig. 3 Example of the experiment cycle diagram

Для оценки полноты сгорания использовалась следующая методика:

По измеренным температуре, давлению и расходу компонентов оценивалась расчетная тепловая мощность, соответствующая полному сгоранию водорода:

$$N_T = Q_{H_2} \cdot G_{H_2} + h_{H_2} \cdot G_{H_2} + h_{O_2} \cdot G_{O_2} + h_{H_2O} \cdot G_{H_2O}$$

где Q_{H_2} - низшая полнота сгорания водорода, G_{H_2} , G_{O_2} , G_{H_2O} - расходы водорода, кислорода и воды, h_{H_2} , h_{O_2} , h_{H_2O} - энтальпии водорода, кислорода и воды, соответствующие измеренным давлению и температуре.

По измеренным температуре и давлению в КИ определялась реальная тепловая мощность, полученная в ВКП:

$$N'_T = h_p \cdot G_p$$

где h_p - энтальпия пара, соответствующая температуре и давлению в КИ, G_p - расход пара, равный суммарному расходу всех компонентов.

Далее определялось количество недогоревшего водорода:

$$G_{H_2}^H = \frac{N_T - N'_T}{Q_{H_2}}$$

$$\Delta_{H_2}^H = \frac{G_{H_2}^H}{G_{H_2}} \cdot 100\%$$

где $\Delta_{H_2}^H$ - процент недогоревшего водорода.

Исследование полноты сгорания проводилось с двумя типами СЭ: с пересекающимися и непересекающимися струями водорода и кислорода. Основной особенностью смесительного элемента с пересекающимися струями является то, что форсунка окислителя расположена по центру СЭ, а форсунки водорода в количестве 14 шт. расположены вокруг нее на равноудаленном расстоянии и наклонены под углом 30°. Такое расположение форсунок позволяет обеспечить более эффективное смешение компонентов в КС и повысить полноту сгорания.

Для смесительного элемента с непересекающимися струями основной особенностью является то, что форсунка окислителя расположена по центру СЭ, а форсунки водорода в количестве 16 шт. расположены вокруг нее на равноудаленном расстоянии. Такое расположение форсунок позволяет снизить тепловые потоки на стенки КС и защитить их от попадания кислорода. С другой стороны, такое расположение форсунок снижает эффективность перемешивания компонентов, что может приводить к снижению полноты сгорания (при неизменном размере КС).

Проведение предварительных испытаний ВКП позволило определить, что полнота сгорания водорода является относительно низкой (менее 87 %). Для повышения полноты сгорания была разработана конструкция камеры испарения, позволяющая изменять диаметр выходного сопла и таким образом менять давление пара в камере сгорания. Проведение последующих испытаний показало, что повышение давления в камере сгорания с 1,4 до 2,7 МПа позволило повысить полноту сгорания водорода с 86 до 97,4 %. Также следует

отметить незначительное повышение полноты сгорания при увеличении температуры генерируемого пара. Водородно-кислородный парогенератор во время испытания показан на рис. 4.



Рис. 4. ВКП во время испытания

Fig. 4. VCP during the test

На следующих этапах исследований тепловых процессов в ВКП была разработана и создана автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП), которая является развитием штатной системы управления и позволяет решать следующие задачи:

- повысить эффективность экспериментального исследования за счет сокращения эксплуатирующего персонала и более быстрого проведения экспериментов;
- гарантировать высокую пожаровзрывобезопасность оборудования;
- визуализировать состояние органов управления и сбор данных для операторского контроля за экспериментами;
- обеспечить воспроизводимость режимных параметров за счет повышения точности и синхронности переключений механизмов управления;
- дополнить штатную систему управления возможностью проведения многорежимных испытаний ВКП.

Созданная АСУ ТП базируется на использовании среды графического инженерного программирования LabVIEW с аппаратным обеспечением National Instruments. Структурная схема на основе выбранных аппаратных средств отражена на Рис 5.

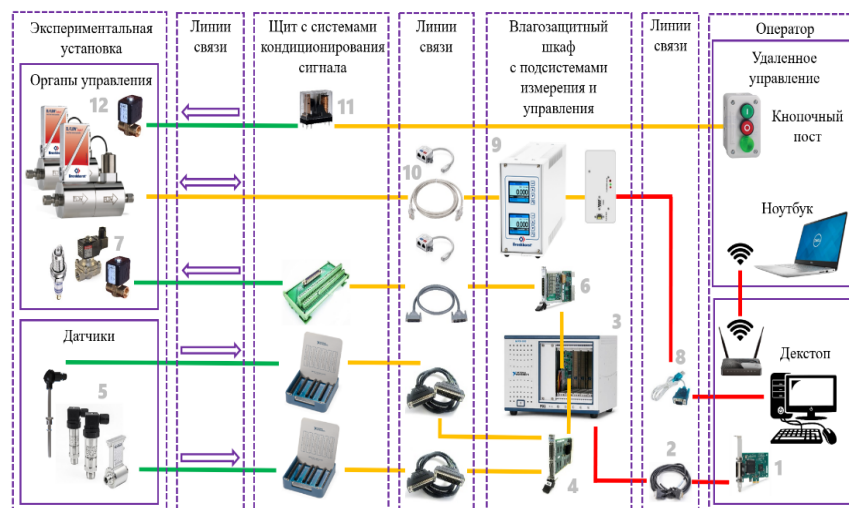


Рис.5 Структурная схема: 1 – плата PCIe-8361; 2 – кабель Mxi-Express; 3 – шасси NI PXI-1078; 4 – модуль аналогового ввода-вывода NI PXI-6289; 5 – датчики давления, термопары, жидкостные расходомеры турбинного типа; 6 – релейный модуль NI PXI-2568; 7 – электроклапана газовые, электроклапана жидкостные, автомобильная свеча зажигания, регуляторы расхода газа Bronkhorst; 8 – кабель RS232; 9 – система индикации, управления и питания E-8000; 10 – кабель Ethernet; 11, 12 – реле и электроклапана кнопочного поста

Fig. 5 Block diagram: 1 – board with PCIe-8361; 2 – vector Mxi-Express cable; 3 – chassis in pxi H-1078 format; 4 – analog I / O module; 5 - pressure sensors, thermocouples, turbine – type liquid flowmeters; 6-NI relay module in pxi - 2568 format; 7 – gas electric valves, liquid electric valves, automobile spark plug, Bronkhorst gas flow regulators; 8 - RS232 cable; 9 – display system, control and power supply electronic 8000; 10 – Ethernet cable; 11, 12-relay and electric valve push-button post

Для реализации циклограмм экспериментов, вариант одной из них приведен на Рис.3, был использован классический конечный автомат состояний, что позволяет:

- выполнять шаги автомата (различные состояния механизмов управления) в непрерывающиеся временные периоды;
- синхронизировать переключение механизмов управления (электроклапана, свеча зажигания, регуляторы расхода газа) между шагами автомата.

Для внесения циклограммы на графическом интерфейсе пользователя задаётся таблица с явными переходами (Рис.6). При включении автомата, состояния – столбцы выполняются последовательно слева на право, изменяя положение механизмов управления в соответствии с назначаемой продолжительностью отдельного состояния.

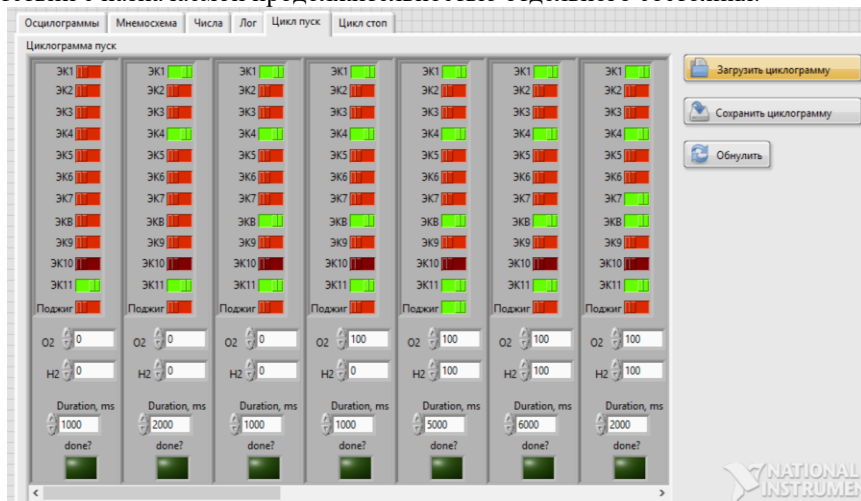


Рис.6 Пример реализации циклограммы пуска на графическом интерфейсе пользователя
Fig. 6 Example of the implementation of the start cycle diagram on the graphical user interface

При выполнении программы параллельно выполняются семь циклов, которые обмениваются между собой потоками данных с помощью очередей. Цикл отображения данных на графический интерфейс пользователя (ГИП) и цикл протоколирования данных непрерывно выполняются с высокой частотой и соответственно отображают и записывают состояния органов управления и показания элементов диагностики. Упрощенный вид алгоритма работы программы представлен на Рис.7, где

- сначала, пока на удаленном кнопочном посту не нажата кнопка готовность (не горит зеленый индикатор), происходит проверка функционирования органов управления установки и на ГИП вносится циклограмма изучаемого эксперимента, которая представляет собой два конечных автомата состояний – пуска и останова (Поз.1 Рис.7);
- затем, когда всё готово, оператор нажимает кнопку готовности на удаленном посту, загорается зелёный индикатор) и запускается эксперимент. Начинает отработывать состояния конечный автомат пуска, который можно прервать с удалённого кнопочного поста, если эксперимент пошел не по плану;
- когда автомат пуска отработает свои состояния или оператор нажмет красную кнопку останова эксперимента, программа переходит к конечному автомату останова.

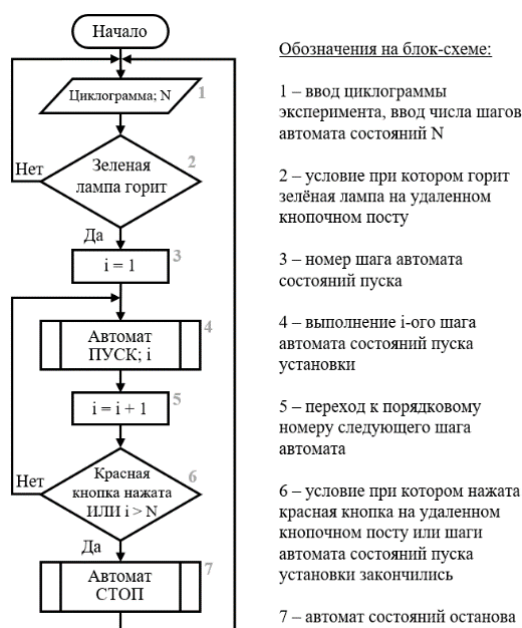


Рис.7 Реализация циклограммы пуска на графическом интерфейсе пользователя
 Fig. 7 Implementation of the start cycle diagram on the graphical user interface

После настройки и отработки АСУ ТП управления было проведено 4 многорежимных испытания ВКП.

Целями данных испытаний были:

- проверка работоспособности конструкции ВКП с разработанной АСУ ТП;
- проведение многорежимных испытаний ВКП;
- изучение полноты сгорания на различных режимах работы ВКП.

Результаты и обсуждения

Результаты проведенных испытаний показаны на Рис.8., Рис.9. и в таблице 1.

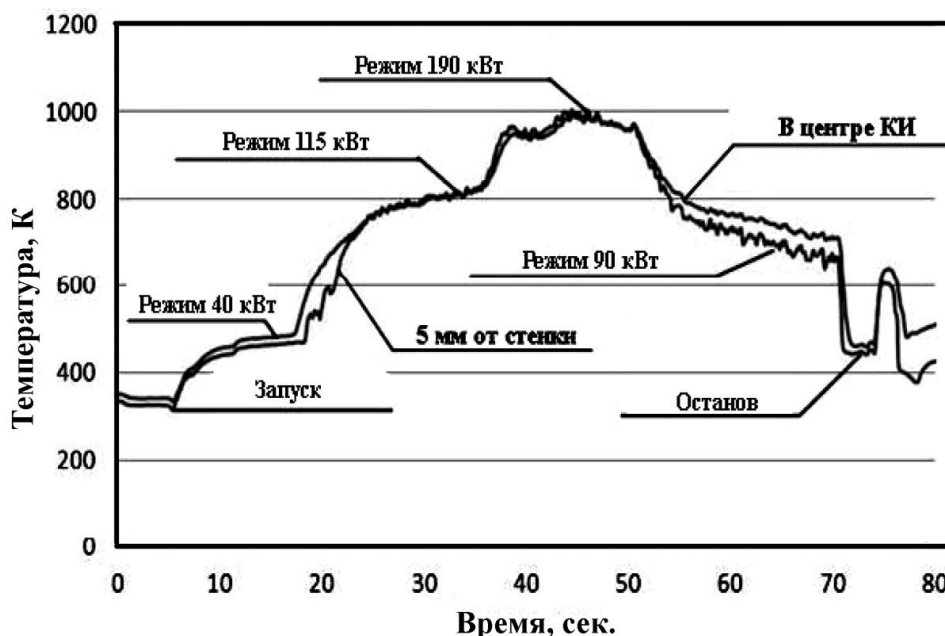


Рис. 8. Температура пара в камере испарения H₂/O₂-парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт во время многорежимного испытания

Figure 8. Steam temperature in the evaporation chamber of the H₂ / O₂ steam generator with a heat output of up to 200 kW during a multi-mode test

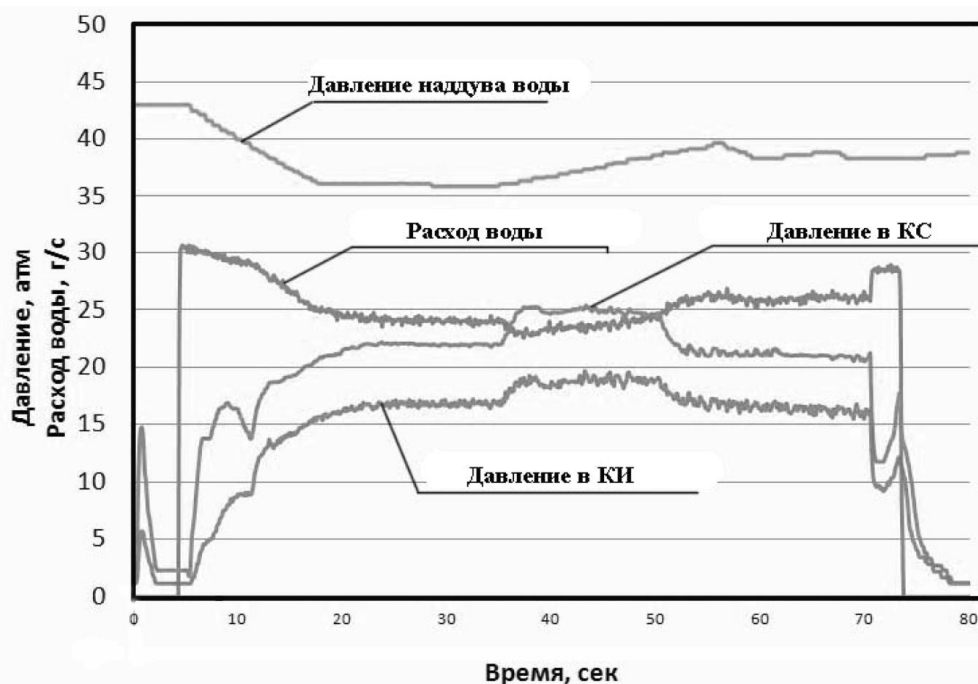


Рис. 9. Изменение расхода охлаждающей воды и давлений в камере испарения H₂/O₂-парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт во время многорежимного испытания

Fig. 9. Changes in the cooling water flow rate and pressure in the evaporation chamber of the H₂ / O₂ steam generator with a thermal power of up to 200 kW during a multi-mode test

По результатам проведенных испытаний можно отметить, что повышение температуры генерируемого пара привело к увеличению полноты сгорания на 0,7-1,1 %. В ходе испытания № 4 работа парогенератора происходила на 3 различных режимах, при этом разработанная АСУ обеспечила требуемую регулировку расходов подаваемых компонентов.

На рис.10. приведены обобщенные результаты проведенных экспериментальных исследований, где представлена зависимость температуры пара от массовой доли воды при различных коэффициентах избытка окислителя.

Таблица 1

Результаты испытаний ВКП						
№ пуска	Средняя температура на выходе из МПГ, К.	Среднее давление в камере сгорания, МПа.	Среднее давление в камере испарения, МПа.	Средний расход воды, г/с.	Расчетная мощность на заданном режиме, кВт	Расчетный процент недогоревшего водорода, %.
1	981,3	2,68	1,92	21,3	84,3	1,61
2	980,2	2,66	1,87	21,6	84,1	1,63
	872,3	2,53	1,84	25,1	70,5	1,72
3	482,1	2,21	1,74	28,7	60,2	2,18
	796,7	2,28	1,81	24,3	83,4	1,92
4	809,5	2,22	1,68	24,2	79,5	1,73
	948,1	2,49	1,81	23,1	90,8	1,65
	762,4	2,17	1,62	26,3	75,1	1,89

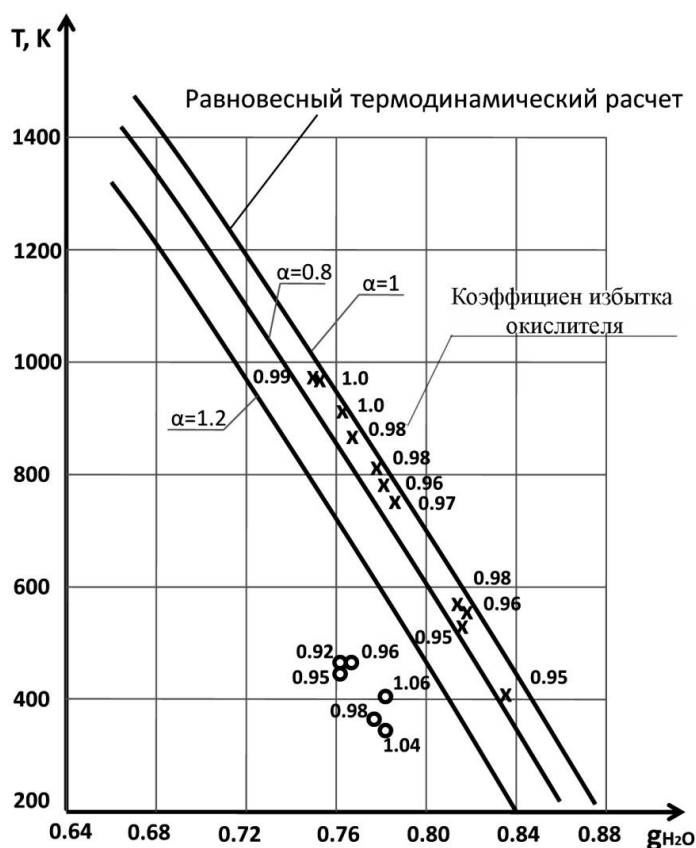


Рис. 10. Зависимость температуры пара от массовой доли воды при различных коэффициентах избытка окислителя: о – при давлении в КС до 1,5 МПа, х – при давлении в КС до 2,5 МПа
 Fig.10. The dependence of the steam temperature on the mass fraction of water at different coefficients of the oxidant excess: o – at a pressure in the CS up to 1.5 MPa, x - at a pressure in the CS up to 2.5 MPa

Выводы

Экспериментальные исследования тепловых процессов в ВКП позволило выявить ряд недостатков разработанной конструкции: низкую полноту сгорания водорода, частые прогары внутренней стенки камеры сгорания и высокую неравномерность поля температур на выходе из парогенератора. Анализ экспериментальных данных выявил основные причины, приводящие к вышеуказанным недостаткам. В результате была проведена разработка модернизированных узлов ВКП, обеспечивающих повышение эффективности его работы. В частности, создание камеры испарения с изменяемым соплом на выходе, позволило снизить количество недогоревшего водорода более чем в 4 раза.

Следует отметить, что для широкого класса автономных энергоустановок, использующих микротурбины (особенно с выхлопом в атмосферу), а также для минипарогенераторов, создаваемых для энерготехнологических применений, суммарная концентрация непрореагировавших газов на выходе из парогенератора киловаттного класса мощности может быть существенно выше, чем для парогенераторов мегаваттного класса мощности (до 3...4 % (об.)). Такие показатели уже достигнуты в созданных нами аппаратах, что, конечно, не исключает необходимости их дальнейшего совершенствования.

В ходе дальнейших исследований были проведены многорежимные испытания водородно-кислородного парогенератора тепловой мощностью до 200 кВт. Для этого была разработана автоматическая система управления, обеспечивающая работу установки на заданных режимах, вместе с этим проводилось изучение неравномерности поля температур в камере испарения. Для проведения испытаний использовались 2 типа камер испарения: с резким расширением потока и без резкого расширения потока. В первом варианте неравномерность потока являлась на 40...70 К ниже, поэтому он был использован для проведения дальнейших исследований. Характерные времена перехода с режима на режим не превышают 10 секунд, что вполне соответствует требованиям при создании автономных энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии и микротурбин.

Литература

1. Солодова Н.Л. и др. Водород-энергоноситель и реагент. Технологии его получения //

- Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19. №. 11-12.
2. Borzenko V.I., Schastlivtsev A.I. Efficiency of steam generation in a hydrogen-oxygen steam generator of kilowatt-power class // *High Temperature*. 2018. Т. 56. №. 6. С. 927-932.
3. Schastlivtsev A.I., Borzenko V.I. Investigation of the distribution of heat fluxes in the combustion chamber of a hydrogen-oxygen steam generator // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2018. Т. 1128. №. 1. С. 012077.
4. Haidn O.J., Fröhlke K, Carl J., Weingartner S. Improved combustion efficiency of a H₂/O₂ steam generator for spinning reserve application”, *International Journal of Hydrogen Energy*. 1998 V. 23, Issue 6. pp. 491-497.
5. Schastlivtsev A.I. et al. Hydrogen-oxygen installations for the energy industry // *High Temperature*. 2020. V. 58. №. 5. pp. 733-743.
6. 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*. – IOP Publishing, 2017. V. 891. №. 1. pp. 012213.
7. Tomarov G.V., Borzenko V.I., Shipkov A.A. Application of Hydrogen–Oxygen Steam Generators for Secondary Flash Steam Superheating at Geothermal Power Plants // *Thermal Engineering*. 2021. Т. 68. №. 1. pp. 45-53.
8. Sternfeld H.J., Heinrich P. A demonstration plant for the hydrogen/oxygen spinning reserve. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1989. V. 14. Issue 10. Pp.703-716.
9. Аминов Р.З., Портянкин А.В. Анализ компоновочных решений электролизного цеха водородной надстройки с учетом надежности и взрывопожароопасности // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018. Т. 20. №. 5-6.

Авторы публикации

Счастливцев Алексей Иванович - к. т. н. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)

Молотов Иван Михайлович – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)

Борзенко Василий Игоревич - к. т. н. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН)

References

1. 1. Solodova NL. et al. Hydrogen is an energy carrier and reagent. Technologies for its production. News of higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY. 2017;19:11-12.
2. Borzenko VI, Schastlivtsev AI. Efficiency of steam generation in a hydrogen-oxygen steam generator of kilowatt-power class. *High Temperature*. 2018;56(6):927-932.
3. Schastlivtsev AI, Borzenko VI. Investigation of the distribution of heat fluxes in the combustion chamber of a hydrogen-oxygen steam generator. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2018;1128(1):012077.
4. Haidn OJ, Fröhlke K, Carl J, et al. Improved combustion efficiency of a H₂/O₂ steam generator for spinning reserve application. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1989;23(6):491-497.
5. Schastlivtsev AI. et al. Hydrogen-oxygen installations for the energy industry. *High Temperature*. 2020;58(5):733-743.
6. Schastlivtsev AI, Borzenko VI. Hydrogen-oxygen steam generator applications for increasing the efficiency, maneuverability and reliability of power production. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2017;891(1):012213.
7. Tomarov GV, Borzenko VI, Shipkov AA. Application of Hydrogen–Oxygen Steam Generators for Secondary Flash Steam Superheating at Geothermal Power Plants. *Thermal Engineering*. 2021;68(1):45-53.
8. Sternfeld HJ., Heinrich P. A demonstration plant for the hydrogen/oxygen spinning reserve. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1989;14(10):703-716.
9. Aminov RZ, Portyankin AV. Analysis of layout solutions of the electrolysis shop of the hydrogen superstructure taking into account reliability and explosion and fire hazard. News of higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY. 2018;20:5-6.

Authors of the publication

Alexey I. Schastlivtsev – Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Ivan M. Molotov – Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Vasily I. Borzenko – Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Получено

30 марта 2021г.

Отредактировано

06 апреля 2021г.

Принято

08 апреля 2021г.