



ИНЖЕНЕРНАЯ РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕКОМБИНАТОРА ВОДОРОДА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛНОМАСШТАБНЫХ РАСЧЕТОВ*

*А.В. Авдеенков^{1,2}, Вл.В. Сергеев², А.В. Степанов², А.А. Малахов²,
Д.Е. Кошманов³, С.Л. Соловьев⁴, Д.Г. Бессарабов¹*

¹Национальный центр «Водород ЮАР», Северо-Западный университет
ул. Хоффмана, Потchefструм, Северо-западная провинция, 2531, ЮАР
e-mail: Dmitri.Bessarabov@nwu.ac.za

²Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт (ФЭИ)
д. 1, пл. Бондаренко, Обнинск, Калужская обл., 249033, Россия

³Инвестиционная научно-производственная компания «Русские энергетические технологии» (РЭТ)
стр. 2Б, д. 2, ул. 2-я Кабельная, Москва, 111024, Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации АЭС (ВНИИАЭС)
д. 25, ул. Ферганская, Москва, 109507, Россия

doi: 10.15518/isjaee.2018.04-06.037-056

Заключение совета рецензентов: 30.10.17 Заключение совета экспертов: 05.12.17 Принято к публикации: 28.12.17

На подавляющем большинстве атомных электростанций с блоками водо-водяных энергетических реакторов для защиты герметичного ограждения и размещаемого в ней оборудования и систем реакторной установки от повреждения в результате возгорания (взрыва) водорода предусмотрены система контроля концентрации водорода и система аварийного удаления водорода. Эти системы выполняют функции по предотвращению образования взрывоопасных смесей в зоне локализации аварий путем поддержания объемной концентрации водорода в смеси ниже пределов безопасности, что обеспечивает сохранение плотности и прочности герметичного ограждения и работоспособности других локализирующих систем безопасности. Ключевым компонентом системы аварийного удаления водорода является пассивный каталитический рекомбинатор водорода, работа которого основана на принципе каталитической рекомбинации водорода и кислорода.

В работе принималась во внимание острая необходимость в проведении полномасштабных динамических расчетов развития аварийных режимов в контейнменте АЭС, сопровождающихся большим выбросом водорода. Для этого на основе имеющихся экспериментальных данных разработана и обоснована простая инженерная теплогидравлическая модель удаления водорода при работе пассивного каталитического рекомбинатора водорода. Представлены результаты применения модели в составе контурных отраслевых кодов: RELAP, TRACE, КОРСАР, – которые предназначены, в том числе, для проведения сквозных многофакторных и полномасштабных расчетов динамики аварийных процессов с выходом водорода в помещения АЭС. Данная модель позволяет обосновать динамику локальных концентраций газовых компонентов смеси в замкнутом пространстве, температур смеси, катализатора и стенок бокса, давления при подаче в бокс водорода, пара.

* Авдеенков А.В., Сергеев Вл.В., Степанов А.В., Малахов А.А., Кошманов Д.Е., Соловьев С.Л., Бессарабов Д.Г. Инженерная расчетная модель каталитического рекомбинатора водорода для проведения динамических полномасштабных расчетов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(04-06):37-56.



Проанализированы различные скорости подачи водорода в закрытый бокс для численного обоснования времени, за которое достигается уровень максимальной концентрации. Рассчитана производительность для нескольких входных концентраций водорода. По результатам сопоставления расчетных и имеющихся экспериментальных данных получено удовлетворительное согласие динамики концентраций, температур катализатора и газа и производительности пассивного каталитического рекомбинатора водорода.

Ключевые слова: атомная электростанция; водо-водяной энергетический реактор; герметичная оболочка; зона локализации аварий; пассивный каталитический рекомбинатор водорода; система водородной безопасности.

HYDROGEN CATALYTIC RECOMBINER'S ENGINEERING MODEL FOR DYNAMIC FULL-SCALE CALCULATIONS

*A.V. Avdeenkov^{1,2}, V.I. Sergeev², A.V. Stepanov², A.A. Malakhov²,
D.Y. Koshmanov³, S.L. Soloviev⁴, D.G. Bessarabov¹*

¹DST Hydrogen Infrastructure Center of Competence (HySA Infrastructure), Faculty of Engineering North-West University, Private Bag X6001, Potchefstroom, 2520, South Africa
e-mail: Dmitri.Bessarabov@nwu.ac.za

²State Scientific Center of Russian Federation – Institute of Physics and Power Engineering (IPPE) 1 Bondarenko Sq., Obninsk, Kaluga region, 249033, Russia

³Investment Scientific-Production Company "Russian Energy Technologies" (RET), 2/2B, 2^d Kabelnaya St., Moscow, 111024, Russia

⁴All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation (VNIIAES) 25 Ferganskaya St., Moscow, 109507, Russia

doi: 10.15518/isjaee.2018.04-06.037-056

Referred 30 October 2017 Received in revised form 5 December 2017 Accepted 28 December 2017

In order to protect the hermetic enclosure and the equipment and systems of the reactor installation housed in it from damage caused by the ignition (explosion) of hydrogen, the overwhelming majority of nuclear power plants with pressurized water reactors are provided with a hydrogen concentration monitoring system and an emergency hydrogen removal system. These systems prevent the formation of explosive mixtures in the accident localization zone by maintaining the volume concentration of hydrogen in the mixture below the safety limits which ensures the preservation of the density and strength of the hermetic enclosure and the operability of other localizing security systems. A key component of the emergency hydrogen removal system is a passive autocatalytic hydrogen recombiner which operation is based on the principle of catalytic recombination of hydrogen and oxygen.

There is an urgent need for a full-scale dynamic calculation of the development of emergency conditions in a nuclear power plant container accompanied by a large release of hydrogen. In order to achieve this goal, we have constructed and justified a simple engineering thermohydraulic model of hydrogen removal in the operation of the PAR based on the available experimental data. The paper presents the application results of the model as a part of contour industry codes: RELAP, TRACE, and CORSAR, intended, among other things, for carrying out multifactor and full-scale calculations of the dynamics of emergency processes with the release of hydrogen into the nuclear power plant premises. This model allows us to substantiate the dynamics of local concentrations of gas components of the mixture in a confined space, the temperature of the mixture, the catalyst and the walls of the box, the pressure when hydrogen or steam is supplied to the box.

We have analyzed various rates of hydrogen supply to a closed box in order to numerically substantiate the time when the concentration reached the maximum level. Moreover, we have calculated the performance for several entrance concentrations of hydrogen, and obtained a satisfactory agreement between the dynamics of the concentrations, temperatures of the catalyst and gas, and the productivity of the passive autocatalytic hydrogen recombiner. These calculations are based on the results of the calculated and the available experimental data comparison.

Keywords: nuclear power plant; pressurized water reactor; hermetic enclosure; accident localization area; passive autocatalytic hydrogen recombiner; hydrogen safety system.



Дмитрий Георгиевич
Бессарабов
Dmitri Bessarabov

Сведения об авторе: канд. хим. наук, директор национального центра «Водород ЮАР» при Северо-Западном университете, ЮАР.

Образование: МГУ им. М.В. Ломоносова, химический факультет (1991 г.); университет Стеленбоша, ЮАР (1996 г.).

Область научных интересов: мембраны; топливные элементы; водород; диффузия.

Публикации: более 100.

Scopus *h*-index 17

Information about the author: Ph.D. in Chemistry, DST National Center: HySA Infrastructure: Director, North-West University, Potchefstroom, South Africa.

Education: Moscow State University, 1991; University of Stellenbosch, South Africa, 1996.

Research interests: membranes; fuel cells; hydrogen; diffusion.

Publications: more than 100.



Александр Владимирович
Авдеенков
Alexander Avdeenko

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, зам. генерального директора АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», Россия; экстраординарный профессор национального центра «Водород ЮАР» при Северо-Западном университете, ЮАР.

Образование: Институт атомной энергетики, Обнинск (1994 г.); Объединенный институт ядерных исследований, Дубна (1996 г.).

Область научных интересов: теоретическая физика; расчетная физика; водород; квантовая химия.

Публикации: более 60.

Scopus *h*-index: 15

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Institute of Physics and Power Engineering (Russia); Deputy General Director of DST National Center; Extraordinary Professor at “HySA Infrastructure” of North-West University, South Africa.

Education: Institute of Atomic and Power Engineering, 1994; Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 1996.

Research interests: theoretical physics; computational physics; hydrogen; quantum chemistry.

Publications: more than 60.



Сергей Леонидович
Соловьев
Sergey Soloviev

Сведения об авторе: д-р техн. наук, научный руководитель АО «ВНИИАЭС», Москва.

Образование: Московский энергетический институт (1982 г.).

Область научных интересов: теплогидравлика.

Публикации: 191.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Supervisor of the OJSC All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation (OJSC VNIIAES), Moscow.

Education: Moscow Power Engineering Institute, 1982.

Research interests: thermohydraulics.

Publications: 191.



Андрей Валентинович
Степанов
Andrey Stepanov

Сведения об авторе: начальник лаборатории, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Образование: Московский инженерно-физический институт (МИФИ) (1984 г.).

Область научных интересов: теплогидравлика; физическая химия.

Публикации: более 30.

Information about the author: Head of Laboratory at State Scientific Center of Russian Federation – Institute of Physics and Power Engineering.

Education: National Research Nuclear University, 1984.

Research interests: thermohydraulics; physical chemistry.

Publications: more than 30.



Владимир Викторович
Сергеев
Vladimir Sergeev

Сведения об авторе: старший научный сотрудник АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Образование: Московский инженерно-физический институт (МИФИ) (1981 г.).

Область научных интересов: гидродинамика двухфазных потоков.

Публикации: более 10.

Information about the author: Senior Researcher at the State Scientific Center of Russian Federation – Institute of Physics and Power Engineering.

Education: National Research Nuclear University, 1981.

Research interests: hydrodynamics of two-phase flows.

Publications: more than 10.





Александр Александрович
Малахов
Alexander Malakhov

Сведения об авторе: инженер-исследователь, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Образование: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (2013 г.).

Область научных интересов: технологии производства, хранения и распределения водорода; моделирование молекулярно-динамических процессов; возобновляемые источники энергии.

Публикации: 3.

Information about the author: Engineer-Researcher at the State Scientific Center of Russian Federation – Institute of Physics and Power Engineering.

Education: National Research Nuclear University “MEPhI”, 2013.

Research interests: technologies for hydrogen production, storage and distribution; modeling of molecular-dynamic processes; renewable energy sources.

Publications: 3.

Введение

Авария 11 марта 2011 г. на АЭС Фукусима-1 показала необходимость пересмотра подходов к управлению запроектными авариями (ЗПА). Учитывая тот факт, что здания двух блоков были разрушены взрывами водорода, во всём мире особое внимание стали уделять исследованиям процессов образования взрывоопасных смесей в зоне локализации аварий (ЗЛА) и поиску эффективных средств предотвращения взрыва и сохранения целостности герметичной оболочки (ГО) атомной станции в ходе ЗПА.

Общепринятая в мире практика по удалению водорода из ГО базируется на принципе пассивной каталитической рекомбинации водорода с использованием каталитических элементов, содержащих платину [1–14]. Каталитические элементы собираются в каталитические блоки и могут быть различной геометрической формы.

В России в оборудовании, реализующем принцип каталитической рекомбинации водорода (ПКРВ) (основной производитель – компания ИНПК «РЭТ»), применяются цилиндрические керамические каталитические элементы с платиновым покрытием [6–7]. На рис. 1 схематично представлено устройство ПКРВ [6–7].

Работа ПКРВ начинается с момента поступления водорода, содержащегося в атмосфере гермозоны, к катализатору. На поверхности катализатора происходит экзотермическая химическая реакция соединения водорода и кислорода. При этом тепловыделение создает движущий полезный напор паровоздушно-водородной смеси и устойчивую естественную циркуляцию через ПКРВ. Устойчивости циркуляции способствует разогрев катализатора с температурой выше температуры газа на выходе из устройства. Газ с продуктами сжигания водорода (водяной пар) через выходное отверстие корпуса выбрасывается в атмосферу.

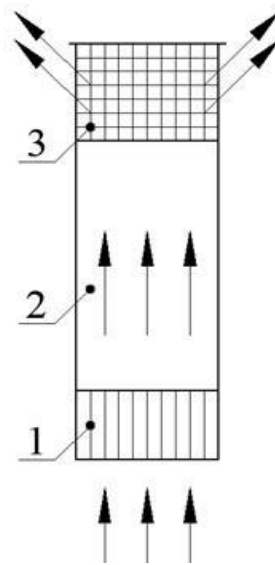


Рис. 1 – Устройство ПКРВ (стрелками показано направление движения водородно-воздушной смеси): 1 – каталитический блок с входным окном снизу; 2 – корпус с конвективным участком, 3 – выходное окно
Fig. 1 – PAR construction (the arrows show the direction of movement hydrogen-air mixture): 1 – the catalytic block with an entrance window from below; 2 – framework with the convection section; 3 – exit window

На рис. 2 представлен внешний вид модели ПКРВ ВРК-500 (ИНПК «РЭТ»).

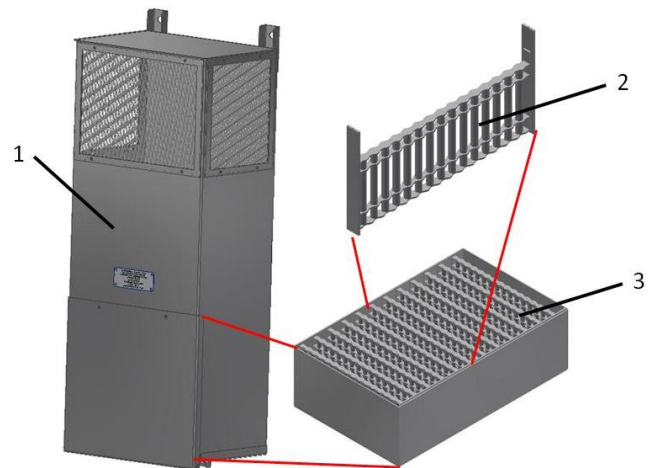


Рис. 2 – Внешний вид ПКРВ (ВРК-500): 1 – корпус ПКРВ; 2 – цилиндрический каталитический элемент; 3 – каталитический блок
Fig. 2 – Appearance of the PAR (RVK-500): 1 – PAR framework; 2 – cylindrical catalytic element; 3 – catalytic block



Первоначально большой объем испытаний ПКРВ серии РВК был выполнен изготовителем (ЗАО «ИНПК РЭТ») [6–7]. В 2016 г. Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ») провел инспекционные испытания на стенде установки измерительной для испытаний систем водородной безопасности АЭС (УИИСВБ) [13], некоторые результаты которых представлены в настоящей работе. Целью данных испытаний было подтверждение основных характеристик ПКРВ модели РВК-500 и обоснование возможности перенесения (масштабирования) полученных результатов на другие модели ПКРВ серии РВК. В рабочем сосуде стенда УИИСВБ параллельно вертикальной оси была установлена штанга, на которой смонтированы предварительно изготовленные консольные элементы для крепления ПКРВ РВК-500. Размещение ПКРВ РВК-500 в рабочем объеме сосуда УИИСВБ представлено на рис. 3. Сосуд имеет цилиндрическую форму объемом 8,9 м³ с трубками подвода водорода и пара.

Испытания по определению работоспособности рекомбинатора включали три основных этапа:

- разогрев смеси в объеме сосуда УИИСВБ до заданной температуры;
- напуск пара (если необходимо);
- напуск водорода в течение 1 ÷ 5 мин;
- перемешивание (для испытаний без пара).

В течение 30–50 мин измерялись:

- температура газа в сосуде;
- температура газа на входе и выходе ПКРВ;
- концентрация водорода на входе ПКРВ;
- концентрация водорода на выходе ПКРВ;
- давление в сосуде;
- температура каталитического блока.

В настоящее время не существует простой инженерной модели работы (удаления водорода) рекомбинатора, которая позволила бы производить полномасштабные динамические расчеты развития аварийных режимов в контейнменте АЭС, сопровождающиеся большим выбросом водорода. Эта работа направлена на построение и обоснование такой простой модели ПКРВ на основе имеющихся экспериментальных данных.

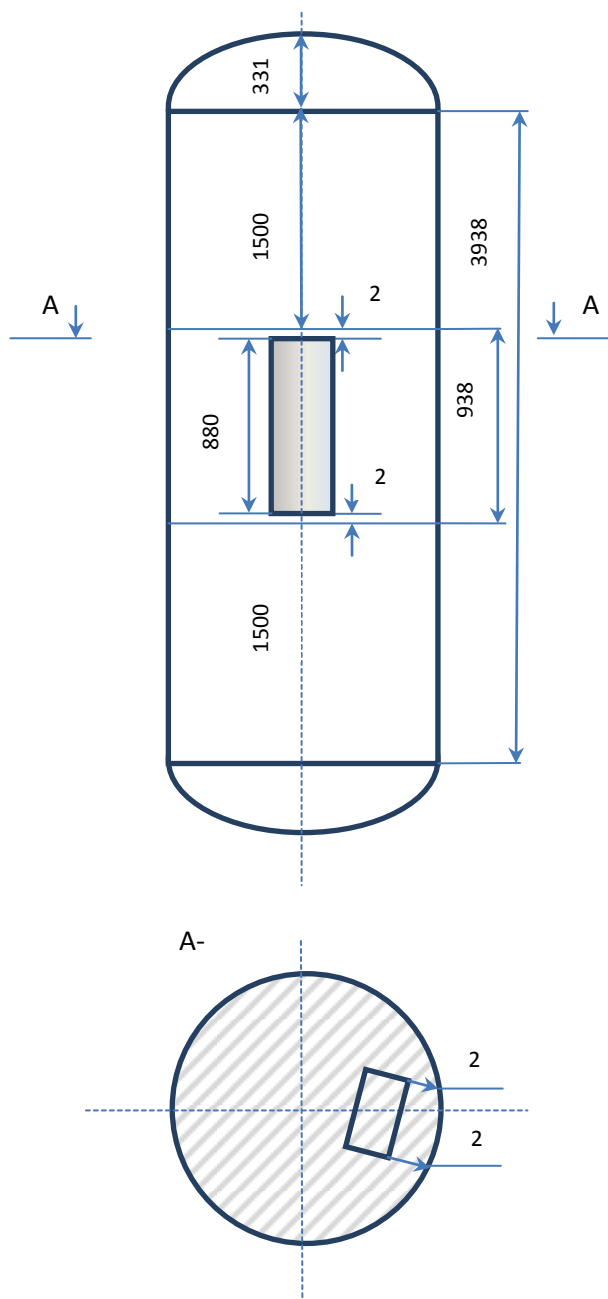


Рис. 3 – Эскиз размещения ПКРВ РВК-500 в сосуде стенда УИИСВБ
Fig. 3 – Sketch of RVK-500 deployment in the experimental vessel

Список обозначений

Буквы латинского алфавита

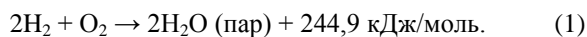
<i>B</i>	Коэффициент расхода, кг/сек
<i>C</i>	Молярная концентрация, Моль/м ³
<i>C_v</i>	Объемная концентрация, кг/м ³
<i>D</i>	Текущий массовый расход водорода, кг/с
<i>D_g</i>	Гидравлический диаметр пучка стержней катализатора, мм
<i>D_h</i>	Тепловой диаметр пучка стержней катализатора, мм
<i>F</i>	Прходное сечение рекомбинатора, м ²
<i>G</i>	Текущий массовый расход естественной циркуляции воздуха, кг/с
ΔH	Энтальпия реакции, Дж/кг
<i>K</i>	Скорость реакции, кмоль/(м ² ·с)

Продолжение списка обозначений

<i>k</i>	Эмпирический коэффициент «полноты рекомбинации»
<i>M</i>	Масса воздуха (смеси) в боксе, кг
<i>R</i>	Универсальная газовая постоянная, м ² ·кг·с ⁻² ·К ⁻¹ ·Моль ⁻¹
<i>P</i>	Давление, Па
<i>T</i>	Температура, °С
<i>t</i>	Время, мин, с
<i>V</i>	Скорость воздуха, м/с
<i>W</i>	Мощность тепловыделения, Вт
Индексы нижние	
0	Начальный
<i>in</i>	Вход
<i>out</i>	Выход
Аббревиатуры	
CFD	Вычислительная гидродинамика
PWR	Реактор с водой под давлением
АЭС	Атомная электростанция
ВВЭР	Водо-водяные энергетические реакторы
ГО	Герметичная оболочка
ЕЦ	Естественная циркуляция
ЗЛА	Зона локализации аварий
ЗПА	Запроектная авария
ПКРВ	Пассивный каталитический рекомбинатор водорода
УИИСВБ	Установка измерительная для испытаний систем водородной безопасности АЭС

Теоретическая часть: физико-химические основы рекомбинации водорода

Реакция окисления водорода является экзотермической, то есть осуществляется с выделением энергии:



Следует отметить, что детальный механизм окисления водорода на платине (гетерогенный механизм химических реакций) является многоступенчатым, и в зависимости от целей моделирования желательнее учитывать от 14 до 16 шагов [15, 16].

На практике детальный механизм обычно упрощают до одношаговой экзотермической реакции, вводя модельную скорость реакции, полученную исходя из детального механизма кинетики с разумными упрощениями. Так, например, сделано в модели Каземо [16]. Для описания рекомбинации при низкой концентрации водорода скорость реакции довольно хорошо описывается кинетическим уравнением (1):

$$K = 4,695 \cdot T^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{C[\text{H}_2]^2}{C[\text{O}_2]}, \quad (2)$$

где $C[\text{H}_2]$ и $C[\text{O}_2]$ – молярные концентрации водорода и кислорода соответственно.

Кинетическая модель Шефера [17], которая часто используется при моделировании каталитической реакции рекомбинации водорода, описывает скорость реакции следующей формулой:

$$K = 14 \cdot \exp\left(-\frac{16,1 \cdot 10^6}{R \cdot T}\right) \cdot C[\text{H}_2], \quad (3)$$

Формула (3) является уравнением Аррениуса с эмпирическими параметрами, где предэкспоненциальный множитель пропорционален концентрации водорода.

Известно, что скорость гетерогенного химического процесса определяется как скоростью протекания химической реакции на поверхности, так и скоростью подвода реагирующих веществ к поверхности (в основном за счет конвективной диффузии). Эти два процесса определяют так называемую кинетическую и диффузионную области [18]. Формула (3) и в меньшей степени формула (2) получены при описании рекомбинации, происходящей в диффузионном режиме, то есть они применимы для процессов, где скорости диффузии (доставки реагирующих компонентов) определяют скорость всего гетерогенного химического процесса. Но сами по себе формулы (2) и (3) не определяют скорость доставки компонентов к катализатору, а только возможную скорость рекомбинации при заданных концентрациях реагирующих компонентов и температуре.

При детальном исследовании динамики проходящих процессов необходимо реализовывать сопряженный подход с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD) и с учетом физико-химических процессов, проходящих как на поверхности катализатора, так и в газовом объеме. Как правило, реализация такого подхода сопряжена с большим объемом вычислений и до сих пор носит больше фундаментальный, чем практический характер.

Эксперименты с ПКРВ в герметичном боксе показывают, что при работе данного устройства значения



температуры и давления изменяются почти так же, как при работе электрообогреваемого устройства идентичной конструкции, мощность которого снижается по экспоненте во времени. Данная аналогия приводит к выводу о том, что в рамках отраслевых контурных двухфазных кодов, предназначенных для моделирования проектных аварий на АЭС в полномасштабной постановке (включая выход водорода [19]), возможен инженерный расчет динамики концентраций водорода и теплофизических параметров в помещениях станции с учетом работы ПКРВ. Для этого необходимо разработать дополнительную модель расчета рекомбинации. При выборе кодов следует в первую очередь опираться на верифицированные, широко применяемые и поддерживаемые разработчиками отраслевые контурные двухфазные коды, включая такие, как RELAP, TRAC, TRACE (США), КОРСАР (Россия). Все перечисленные коды позволяют моделировать многокомпонентную парогазовую среду переменного состава (односкоростное приближение для газовой фазы) и имеют специальные модели для расчетов генерации водорода в активной зоне (пароциркониевая реакция и радиолиз воды).

Необходимо отметить возможности современных CFD-кодов для 3D-моделирования рассматриваемых процессов в контейменте с сильной пространственной детализацией, но в отличие от контурных кодов в сокращенной по масштабу физических процессов постановке. Модель многокомпонентной смеси газов в CFD-кодах также является односкоростной и одно-температурной, что предполагает идентичность основных расчетных результатов. Отличие состоит в применении модели вязкого газа и моделей турбулентности.

Простая модель теплогидравлики рекомбинатора в составе закрытого бокса с замыканием через осредненную концентрацию водорода

Рассмотрим упрощенную однокомпонентную расчетную модель ПКРВ в составе опытного бокса для анализа процессов и реализацию этой модели в одном из кодов.

Производительность рекомбинатора (текущий массовый расход сжигаемого водорода, кг/с) описывается теоретическим уравнением:

$$D = k \cdot G \cdot C = k \cdot F \cdot V \cdot C_v, \quad (4)$$

где G – текущий массовый расход естественной циркуляции (ЕЦ) воздуха через ПКРВ; C – текущая массовая концентрация водорода на входе в рекомбинатор (кг/кг); C_v – объемная концентрация (кг/м³); V – скорость воздуха в ПКРВ; F – проходное сечение рекомбинатора (согласовано через пористость со скоростью); k – эмпирический коэффициент «полно-

ты рекомбинации» водорода – доля «сжигаемого» реагента от поступающего в устройство.

Мощность тепловыделения (Вт) при сжигании водорода в кислороде воздуха (независимо от способа сжигания: детонация, горение или рекомбинация) составляет:

$$W = \Delta H \cdot D, \quad (5)$$

где ΔH – энтальпия реакции (см. (1) в Дж/кг). Дифференциальное уравнение для динамики средней концентрации водорода в закрытом боксе без источников с начальной концентрацией $C(t=0)$ имеет вид:

$$M_0 \cdot \frac{dC}{dt} \equiv -D = -k \cdot C \cdot G, \quad (6)$$

где M_0 – начальная масса воздуха в боксе. В дальнейших выкладках коэффициент полноты рекомбинации временно опускается ($k = 1$).

При наличии источника водорода (G_H) уравнение баланса для средней массовой концентрации водорода в боксе имеет вид:

$$M_0 \cdot \frac{dC}{dt} = -C \cdot G + G_H(t), \quad (7)$$

и решается аналитическим методом:

$$\begin{aligned} C(t) &= \frac{1}{\mu(t)} \cdot \left(\int f(t) \cdot \mu(t) dt + \text{const} \right), \\ \mu(t) &= \exp\left(\int a(t) dt \right), \\ a(t) &= \frac{G(t)}{M_0}, \\ f(t) &= \frac{G_H(t)}{M_0} \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) следует, что при отсутствии рекомбинатора (или при концентрации водорода ниже порогового уровня для ПКРВ) концентрация увеличивается линейно во времени при постоянном притоке водорода. В идеальном случае, при постоянном расходе воздуха через ПКРВ и постоянном притоке водорода, в боксе устанавливается постоянное значение средней концентрации водорода (массовое), равное отношению притока на расход воздуха ($k = 1$):

$$C = \frac{G_H}{G}. \quad (9)$$

Полное решение уравнения (7) при постоянных расходах и нулевой начальной концентрации принимает вид:



$$C(t) = \frac{G_H}{G} \cdot (1 - \exp(-\frac{G_H \cdot t}{M_0})). \quad (10)$$

При отсутствии источника водорода, $f(t) = 0$, и при наличии заданной начальной концентрации в боксе в результате интегрирования уравнения (6) получим экспоненциальный закон снижения средней концентрации водорода ($k = 1$):

$$C = C(t = 0) \cdot \exp[-\frac{1}{M_0} \int_0^t G(t) dt]. \quad (11)$$

Выражение (11) имеет физически очевидный смысл. Темп снижения концентрации определяется (при $k = 1$ и $G(t) \approx \text{const}$) отношением между расходом ЕЦ через ПКРВ и начальной массой воздуха в боксе.

С помощью формул (4), (5) и (11) можно определить текущую мощность тепловыделения в зависимости от текущего расхода парагазовой смеси при ЕЦ через рекомбинатор:

$$W = k \cdot \Delta H \cdot G \cdot C(t = 0) \times \exp[-\frac{k}{M_0} \int_0^t G(t) dt]. \quad (12)$$

Эмпирический коэффициент (параметр) полноты рекомбинации k существенным образом влияет на мощность тепловыделения и темп снижения тепловыделения и, соответственно, темп снижения средней концентрации водорода. Данный параметр при условии диффузионного режима, а именно при таком режиме и работает рекомбинатор, полностью определяется свойствами катализатора и является важным в расчетных моделях любого уровня.

Наиболее значимым в представленных выкладках (12) является то, что динамика тепловыделения определяется начальной концентрацией водорода и зависит от расхода. Это позволяет свести задачу к расчету естественной конвекции воздуха и определению расхода ЕЦ через ПКРВ, где каталитический блок является «нагревателем», а стенка бокса с большой теплоемкостью играет роль «холодильника». При этом воздух рассматривается как идеальный газ, а бокс с ПКРВ в контурных кодах может рассматриваться как единое 2D – 3D пористое тело с заданным гидравлическим сопротивлением пучка каталитических элементов. Для замыкания тепловой части задачи достаточно использовать модель стока тепла к корпусу бокса конечной (и большой) теплоемкости. Действительно, даже при наличии идеальной теплоизоляции опытного бокса (с объемом около 10 м^3) полная теплоемкость стального корпуса бокса весом 200 кг на порядок превышает полную теплоемкость воздуха. В результате в пределах 30 ÷ 60 мин испытаний ПКРВ

температура стенок бокса будет практически неизменной (холодной).

При каталитическом «сжигании» водорода, мощность тепловыделения химической реакции генерируется на катализаторе. В этом случае температура катализатора всегда выше температуры газа на выходе. Химическая реакция проходит в пределах пограничного слоя с катализатором, и основная доля тепла отводится к катализатору, теплопроводность основы которого даже для керамики (корунд) значительно выше молекулярной теплопроводности воздуха.

Предлагаемая расчетная модель позволяет обеспечить экспериментально наблюдаемую значительную задержку по времени до достижения максимума температуры воздуха на выходе из ПКРВ. Причина этой задержки обусловлена тем, что полная теплоемкость катализатора в 180 раз превосходит полную теплоемкость проточного воздуха в рекомбинаторе. Следовательно, в расчетной модели очень важно определять коэффициент теплоотдачи от пучка катализатора к газовой смеси. Значение коэффициента (так же, как и параметр « k ») определяет и температуру катализатора, и температурный напор между катализатором и газом.

Для проверки расчетной схемы примем во внимание типичные для рекомбинации водорода в закрытом боксе экспериментальные результаты, полученные и проанализированные в [6–8, 14, 20, 21] (рис. 4 и 5).

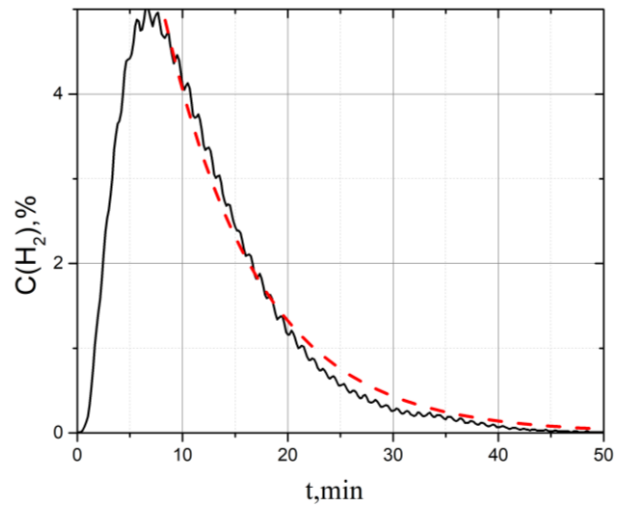


Рис. 4 – Экспериментальная динамика (непрерывная кривая) объемной концентрации водорода (в об.%) вблизи входного окна ПКРВ в режиме «напуск – прекращение» подачи водорода в сосуд в зависимости от времени (мин.) и расчетная динамика средней объемной концентрации водорода в боксе при начальной концентрации 0,0036 кг/кг (5 % объемных)

Fig. 4 – Experimental dynamics (continuous curve) of the volumetric concentration of hydrogen (in vol.%) near the input window of the PAR in the filling-stopping mode of the hydrogen supply into the vessel as a function of time (min.) and the calculated dynamics of the average volumetric hydrogen concentration in the box at the initial concentration of 0.0036 kg / kg (5% volumetric)

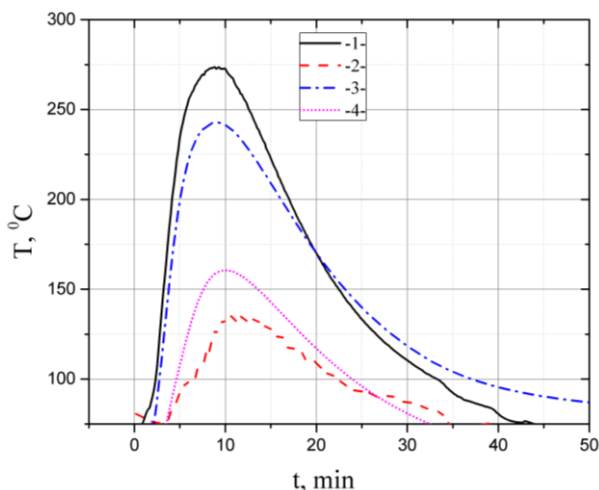


Рис. 5 – Экспериментальная динамика температур (С) в режиме «напуск – прекращение» подачи водорода в сосуд в зависимости от времени (мин.): температуры на катализаторе (1 – эксперимент, 3 – расчет) и на выходе из рекомбинатора (2 – эксперимент, 4 – расчет)
Fig. 5 – Experimental dynamics of temperatures in the filling-stopping mode of the hydrogen supply to the vessel depending on time: the temperatures on the catalyst (1 – experiment, 3 – calculation) and at the exit from the recombiner (2 – experiment, 4 – calculation)

Начальное давление составляет около 1,2 бар, начальная температура в сосуде – около 50 °С. Начальная (в долях) заданная массовая концентрация водорода равна 0,0036 кг/кг (5 % объемных).

Моделируется прямой подвод мощности к каталитическим элементам ПКРВ (в нижней части, приблизительно ¼ корпуса ПКРВ) и конвективный нагрев воздуха в проточной части устройства от «горячих» каталитических элементов.

Расчеты выполнялись по модели пористого тела (среда – воздух) с заданным гидравлическим сопротивлением ПКРВ. Однокомпонентный газ (воздух) представлен как идеальный, что обеспечивает автоматическое получение полезного напора ЕЦ в ПКРВ за счет изменения плотности при разогреве, а также динамику давления. Гидравлическое сопротивление ПКРВ моделировалось по квадратичному закону зависимости от скорости. Для моделирования применялся расчетный код TRACE-V5. Реализация заданной функции мощности по соотношению (12) осуществлялась во всех контурных кодах с помощью внешних программируемых функций. Коэффициенты теплоотдачи во всех отмеченных кодах рассчитываются по общеизвестным эмпирическим корреляциям. Расчетная схема модели представлена на рис. 6.

Модель имеет следующие составляющие:

- бокс высотой 4,6 м и диаметром 1,6 м;

- ПКРВ высотой 0,8 м, высотой каталитического слоя 0,2 м (снизу ПКРВ) и с проходным сечением по коробу ПКРВ 0,07 м²;
- катализатор: 300 стержней высотой 200 мм и внешним диаметром 6 мм;
- основа – корунд.

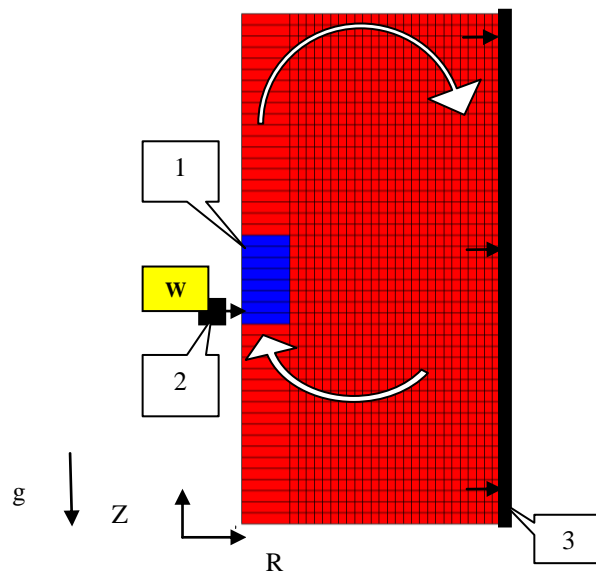


Рис. 6 – Схема размещения ПКРВ в герметичном боксе, расчетная двумерная сетка в цилиндрических R-Z координатах и схема тепловых потоков: 1 – проточная часть ПКРВ; 2 – катализатор; 3 – стенка бокса
Fig. 6 – Scheme for placing the PAR in a sealed box, a two-dimensional mesh calculated in cylindrical R-Z coordinates, and a heat flow diagram: 1 – the PAR flowing part; 2 – the catalyst; 3 – the box wall

Результаты этого расчета в сравнении с экспериментальными данными представлены на рис. 4–5. Дополнительные исходные данные при расчете были следующими: коэффициент полноты рекомбинации k составил 0,4 (получен благодаря серии вариантных расчетов в результате сравнения с опытными данными); гидравлический и тепловой диаметры пучка стержней катализатора $D_g = D_h = 8$ мм; расчетный максимальный коэффициент теплоотдачи – 30 Вт/м² К.

Сравнение расчетных и опытных данных показало хорошее соответствие по динамике концентраций водорода и удовлетворительное (не выше 30 К) по динамике температур, несмотря на различие в сценариях. При проведении эксперимента (см. рис. 6) подача водорода была не мгновенной и сопровождалась перемешиванием для достижения достаточно гомогенной смеси (этот процесс занимал от минуты до двух). Следует отметить, что данное сравнение проводилось только для кривой падения концентрации водорода. Пик концентрации водорода наблюдался приблизительно на 6 мин работы

рекомбинатора (см. рис. 4), то есть значительно позже окончания подачи водорода. Эта модель, в числе прочего, должна объяснить столь заметную задержку в достижении максимальной концентрации водорода.

Важно также, что выходное окно ПКРВ конструктивно расположено на вертикальной стенке (выход потока с поворотом на горизонт), что не учитывалось в расчетах.

На рис. 7–8 представлена расчетная динамика расхода смеси и давления в боксе.

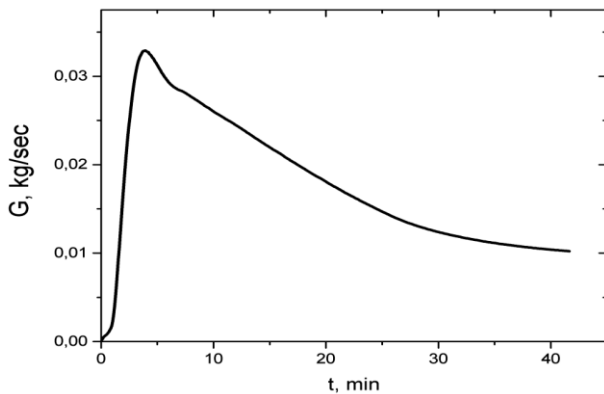


Рис. 7 – Расчетная динамика расхода при ЕЦ через ПКРВ в зависимости от времени

Fig. 7 – The dependence of calculated flow dynamics at natural circulation through PAR on time

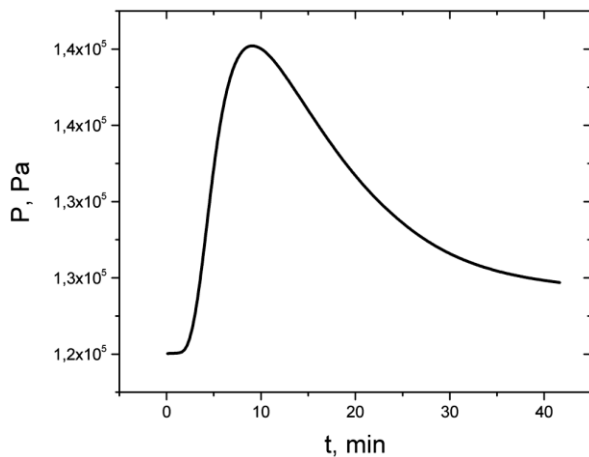


Рис. 8 – Расчетная динамика давления в боксе
Fig. 8 – Calculated dynamics of pressure in the box

В течение 400 с (~6,7 мин) мощность тепловыделения превышает мощность, отводимую к воздуху, то есть происходит разогрев катализатора. При этом температура воздуха и расход ЕЦ монотонно увеличиваются. Далее по мере снижения концентрации и, следовательно, мощности снижается расход ЕЦ (в 3 раза при снижении концентрации в 10 раз). Данная

закономерность соответствует аналитическому решению (квадратичный закон сопротивления).

Представленная численная динамика средней концентрации в боксе и расхода ЕЦ через рекомбинатор может быть получена и аналитическим способом для стадии квазистационарного процесса монотонного снижения расхода (после этапа предварительного разогрева катализатора). В этом случае из уравнения баланса гидравлического сопротивления рекомбинатора и развиваемого полезного напора следуют такие выводы: 1) сопротивление пропорционально квадрату расхода; 2) полезный напор пропорционален подогреву газа в устройстве; 3) подогрев равен отношению мощности к расходу; 4) мощность пропорциональна расходу и концентрации водорода. Таким образом, аналитическое решение для расхода имеет следующий вид:

$$G = B \cdot C^{1/2} \quad (13)$$

где B – коэффициент расхода (комплекс свойств воздуха, гидравлического сопротивления и геометрии ПКРВ). Подстановка (13) в (6) с последующим интегрированием приводит к выражению для динамики концентрации:

$$C(t) = \frac{1}{(C_0^{-1/2} + B \cdot t \cdot M/2)^2} \quad (14)$$

где C_0 – начальная средняя массовая концентрация водорода в боксе; t – текущее время; M – масса воздуха (смеси) в боксе. Аналитическое решение (13, 14) демонстрирует не экспоненциальное падение концентрации водорода в боксе, а квадратичное в зависимости от времени.

Многокомпонентная модель

Основное упрощение представленной в разделе «Простая модель теплогидравлики рекомбинатора...» модели может быть устранено, если применять гидродинамическую модель смеси идеальных газов (воздуха, водорода и пара) переменного состава. При этом в данной модели используется одно уравнение импульса и энергии для парогазовой многокомпонентной смеси. Перенос водорода в модели контурных кодов осуществляется только конвективным путем (диффузия не рассматривается).

Смесь газов в контурных кодах рассматривается с переменным во времени составом, что является необходимым условием для моделирования типовых

ситуаций с генерацией водорода. Для важнейших реакций с образованием водорода в контурных отраслевых кодах имеются соответствующие специальные полуэмпирические расчетные модели.

Изменение состава смеси газа (парогазовой смеси) в результате реакции водорода с кислородом воздуха в РК КОРСАР и RELAP может быть обеспечено только с помощью граничного условия по гидродинамике через источник поступающей массы данного компонента смеси (заданный или управляемый по алгоритму расход конкретного компонента газа: H_2 , O_2 , N_2 , H_2O – в моделируемый контур). Сток массы сухой смеси (естественный на граничное условие по давлению или искусственный с заданным отрицательным расходом) реализуется только в виде стока смеси газов из последней ячейки перед граничным условием без выделения конкретных компонентов. Последнее ограничение принципиальным образом усложняет расчетную схему для моделирования химических реакций с замещением компонентов в отмеченных контурных кодах.

В этой связи для моделирования процесса рекомбинации (замещения компонентов смеси) в контуре необходимо «разомкнуть» тракт рекомбинатора с последующей сшивкой граничных условий по одной из следующих схем.

В полной постановке схема сопряжения имеет вид:

А. Текущее давление на выходе из проточной части рекомбинатора равно давлению в боксе в сечении возврата потока.

Б. Текущая температура компонентов смеси (азот, кислород, водород, пар) в сечении возврата потока в бокс равна температуре смеси на выходе из рекомбинатора.

В. Текущий массовый суммарный расход смеси в сечении возврата потока равен расходу смеси на выходе из рекомбинатора.

Г. Разность высотных отметок проточной части рекомбинатора строго соответствует разности высотных отметок между возвратом газа в бокс и отметкой входа в рекомбинатор (для исключения ложного наведенного полезного напора ЕЦ).

Д. Изменение состава смеси в сечении возврата определяется индивидуальными изменениями расходов компонентов по коэффициентам химической реакции:

$$\begin{aligned} G_{out}(H_2) &= G_{in}(H_2) - D, \\ G_{out}(O_2) &= G_{in}(O_2) - 8D, \\ G_{out}(H_2O) &= G_{in}(H_2O) + 9D, \\ G_{out}(N_2) &= G_{in}(N_2), \end{aligned} \quad (15)$$

где D (кг/с) – расход «сгораемого» водорода.

Е. Расход «сгораемого» водорода в рекомбинаторе и мощность тепловыделения в рекомбинаторе определяется уравнениями:

$$D = k G_{in} G_{in}(H_2), \quad (16)$$

$$G_{out}(H_2) = (1-k)G_{in}(H_2) = (1-k)G_{in} G_{in}(H_2),$$

где $k \in [0,1]$ – эмпирический коэффициент полноты рекомбинации водорода.

Ж. Выделяемая тепловая мощность при сгорании водорода в кислороде вычисляется по формуле (5).

В данной постановке бокс может быть смоделирован как пространственный объем, а проточная часть рекомбинатора – как одномерный канал с тепловыделением (5). Представление проточной части рекомбинатора в форме пористого тела также возможно, но не дает новой информации. В обоих вариантах (одномерный канал или пористое тело) необходимо определить извне коэффициент гидравлического сопротивления ПКРВ и коэффициент теплоотдачи.

Полная постановка (пункты А–Ж) при реализации в конкретном коде (RELAP) технически осуществима, но не может гарантироваться численная устойчивость расчета текущего расхода в условиях ЕЦ воздуха (с низким коэффициентом сопротивления ПКРВ). Действительно, скоростной напор, определяющий потери давления на сопротивление ПКРВ, составляет всего 0,05 Па при характерной скорости воздуха 0,3 м/с. Для жидкости (вода) значение данной величины на 3 порядка выше и проблема устойчивости рассмотренной схемы сопряжения решается без проблем.

В этой связи отработана вторая, сокращенная расчетная схема сопряжения объемов ПКРВ и бокса для РК RELAP, суть которой заключается в отказе от расчета мгновенного расхода ЕЦ, но с заменой ее на заданную функцию расхода в зависимости от времени или расхода в зависимости от концентрации на входе извне (таблично или функционалом). В качестве заданной зависимости расхода от концентрации возможно использовать информацию по модели раздела «Простая модель теплогидравлики рекомбинатора...», аналитическую зависимость (10) или прямые экспериментальные данные, представленные в следующем разделе. При этом пункты, отмеченные как «А» и отчасти «Г» не требуются. Данная расчетная схема обладает абсолютной устойчивостью и представлена на рис. 9 (RELAP).

Расчетная схема для кода КОРСАР аналогична, но с заменой 2D представления бокса на разветвленный одномерный контур.



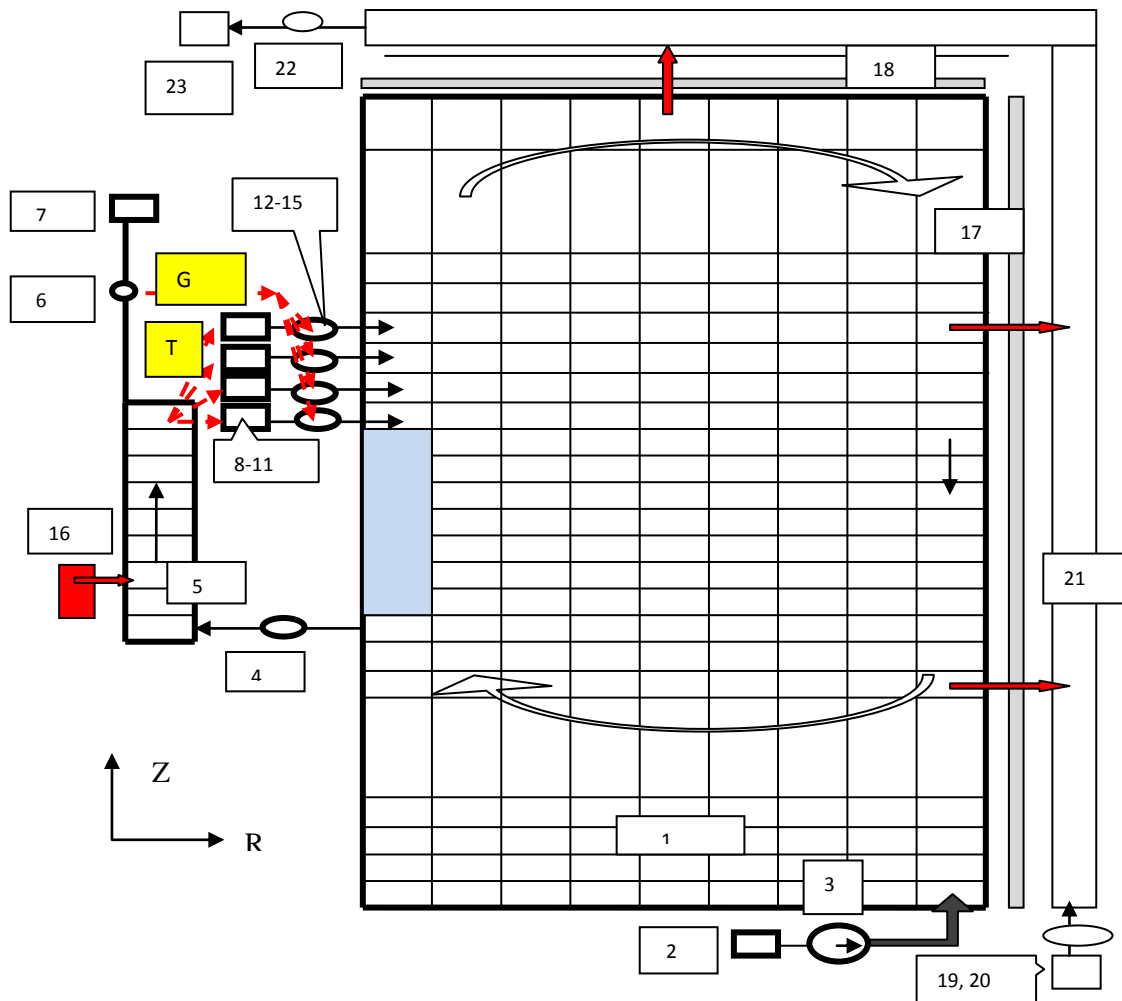


Рис. 9 – Расчетная схема ПКРВ и бокса для кода RELAP-5-3D:

1 – (MULTID) 2D-объем бокса (смесь); 2 – (TMDPVOL) граничное условие по температуре водорода на входе в бокс; 3 – (TMDPJUN) управляемый источник расхода водорода в бокс; 4 – (TMDPJUN) управляемый источник расхода смеси на входе в рекомбинатор; 5 – (PIPE) 1D-проточная часть рекомбинатора; 6 – (SINGLJUN) соединение на выходе рекомбинатора; 7 – (TMDPVOL) граничное условие по давлению на выходе из рекомбинатора; 8-11 – (TMDPVOL) граничные условия по температуре H_2 , N_2 , O_2 , H_2O на возврате газов в бокс после рекомбинатора; 12-15 – (TMDPLJUN) граничные условия по расходу H_2 , N_2 , O_2 , H_2O на возврате газов в бокс; Теплопроводящие структуры: 16 – (HS) каталитические стержни с тепловыделением химической реакции; 17 – (HS) боковая (теплоизолированная) стенка бокса; 18 – (HS) верхняя стенка бокса; Контрольные (управляющие) структуры: T – передача температуры смеси с выхода рекомбинатора на возврат в бокс; G – передача расходов компонентов смеси (H_2 , N_2 , O_2 , H_2O) с выхода рекомбинатора на возврат в бокс с учетом замещения; 2 контур – атмосферный воздух; 19 – (TMDPVOL) граничное условие на входе по температуре воздуха; 20 – (TMDPJUN) граничное условие на входе по скорости воздуха; 21 – (PIPE) «канал» охлаждения бокса; 22 – (SINGLJUN) соединение; 23 – (TMDPVOL) граничное условие по давлению на выходе (атмосферное)

Fig. 9 – The calculation scheme of the PAR and the box for the RELAP-5-3D code:

1 – 2D box volume with the mixture; 2 – boundary condition on the temperature of hydrogen at the entrance to the box; 3 – controlled source of hydrogen flow into the box; 4 – the controlled source of the mixture flow at the input to the recombiner; 5 – 1D flow-through part of the recombiner; 6 – connection at the exit of the recombiner; 7 – the boundary condition for the pressure at the exit of the recombiner; 8-11 – boundary conditions for H_2 , N_2 , O_2 , H_2O temperature on the return of gases to the box after the recombiner; 12-15 – boundary conditions for consumption of H_2 , N_2 , O_2 , H_2O on return of gases to the box; 16 – catalytic rods with heat release of chemical reaction; 17 – lateral (thermally insulated) wall of the box; 18 – upper side of the box; T – transfer of the mixture temperature from the exit of the recombiner to return to the box; G – flow of the components of the mixture – H_2 , N_2 , O_2 , H_2O from the exit of the recombiner to return to the box taking into account the displacement; 19 – boundary condition at the air temperature entrance; 20 – air flow rate boundary condition; 21 – “channel” cooling box; 22 – connection; 23 – boundary condition on the outlet pressure (atmospheric)

Тестирование модели на задаче вертикальной стратификации водорода

Предварительно по представленной схеме (без ПКРВ, стенок бокса) было проведено тестирование

многокомпонентной парогазовой модели гидродинамики контурных кодов на задаче «подача – прекращение подачи» водорода в герметичный бокс высотой 4,6 м с воздухом. При этом инжектор был на нижней отметке бокса. Тестировалась задача

вертикального гравитационного расслоения водорода и воздуха с помощью кода RELAP-5-3D. Использовалась 2D-модель бокса. По затуханию колебаний модуля локальной скорости в избранных точках (менее 1 см/с) можно сделать вывод о том, что стабилизация профиля концентрации водорода произошла через 170 с момента прекращения подачи водорода.

Второй тест (табл.) демонстрирует вертикальную стратификацию водорода и водяного пара при инъекции в бокс водорода с паром. В таблице показаны результаты стратификации компонентов парогазовой смеси на 500 с после инъекции водорода (0,024 кг) и пара (0,24 кг) в бокс в течение 100 с. Средняя по объему бокса доля неконденсата составляет 0,943 кг/кг, средняя концентрация пара – 0,057 кг/кг и средняя доля водорода – $2,786 \cdot 10^{-3}$ кг/кг, что соответствует объемной концентрации водорода в 4 %.

Таблица
Стабилизированные профили концентраций газов и пара по высоте бокса $H = 4,6$ м без рекомбинатора
Table
Stabilized profiles of gas and vapor concentrations in the height of the box $H = 4.6$ m without PAR

Относительная высота и узлы сетки, Z	Массовая концентрация (относительная), $C(H_2)$	Массовая концентрация неконденсата и (пара)	Массовая концентрация, $C(N_2)$	Массовая концентрация, $C(O_2)$
0 (1) – низ	1,90218E-04	0,968 (0,032)	0,83984	0,15997
0,2 (10)	6,51076E-04	0,959 (0,041)		
0,4 (20)	2,38641E-03	0,947 (0,053)		
0,6 (30)	4,47233E-03	0,931 (0,069)		
0,8 (40)	4,90127E-03	0,928 (0,072)		
1 (50) – верх	4,93205E-03	0,928 (0,072)	0,83586	0,15921
Z полная = 4,6 м	Максимум/среднее = 1,77	Максимум/среднее = 1,26		

Важно отметить, что высота бокса существенно влияет на коэффициент вертикальной стратификации водорода (отношение максимальной к средней балансовой концентрации). Так, при высоте бокса 23 м (в 5 раз выше базового варианта) расчетный коэффициент составил 3,47 для водорода при средней объемной концентрации водорода 3,7 % и отсутствии пара. Аналогичные качественные результаты были получены по CFD-кодам (ANSYS-CFX) при использовании односкоростной модели смеси газов.

Третий тест – это повторное приведение стратифицированного водорода в воздухе постоянной инъекцией водяного пара в бокс. Инжекторы были на нижней отметке бокса; код – RELAP-5-3D. Результаты показывают, что первоначальная стратификация водорода может быть легко разрушена постоянной инъекцией третьего компонента (пара). В более общей формулировке организация циркуляции (перемешивания) в боксе, независимо от способа, приводит к выравниванию концентрации водорода по высоте бокса. Полученный результат важен для моделирования натурального сценария в контейменте.

Четвертый тест (с проверкой фазовых переходов) представляет собой запуск сплинкерной системы – подачи холодной воды на верхнюю отметку бокса с изначально стратифицированным водородом и паром в воздухе. Результаты расчетов также показали разрушение вертикальной стратификации водорода при подаче недогретой воды в парогазовую смесь бокса. Протестировано снижение давления до образования небольшого вакуума, снижение температур, образование «лужи» жидкости на дне бокса.

Таким образом, тестирование модели смеси газов в контурном коде RELAP-5-3D продемонстрировало

качественное соответствие наблюдаемым процессам стратификации и устойчивости стратификации компонентов в больших объемах.

Результаты расчетов с рекомбинатором

Тестовый расчет с ПКРВ, представленный в разделе «Простая модель теплогидравлики рекомбинатора...», был повторен по полной модели. Заданная упрощенная динамика расхода через устройство представлена на рис. 10.

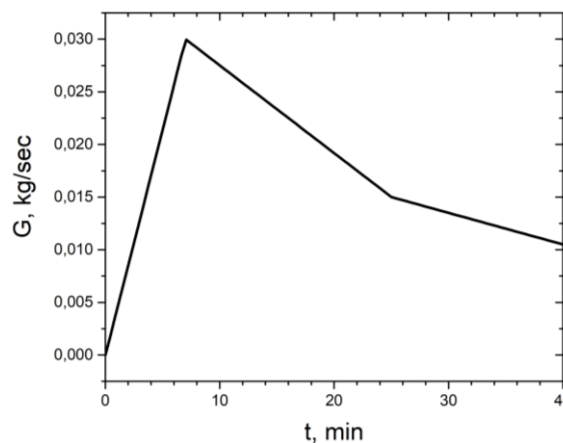


Рис. 10 – Заданная динамика расхода через ПКРВ и подачи водорода (из нижней части бокса)
Fig. 10 – Specified flow dynamics through the PAR and hydrogen supply (from the bottom of the box)

На рис. 11–14 представлены основные результаты расчета. Приняты следующие дополнительные



параметры: коэффициент рекомбинации – 50 %; гидравлический и тепловой диаметр пучка катализатора – 6 мм; расчетный коэффициент теплоотдачи в пучке – 28 Вт/ м² К (в максимуме).

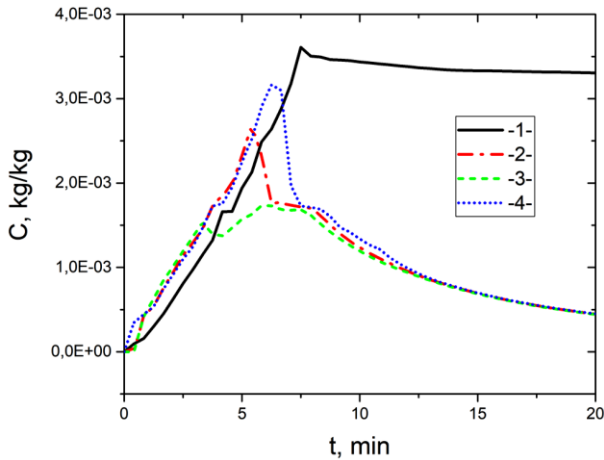


Рис. 11 – Динамика массовой доли водорода в боксе в сечении на половине радиуса. Массовые доли водорода: 1 – низ бокса; 2 – выход из ПКРВ; 3 – верх бокса; 4 – вход в ПКРВ

Fig. 11 – Dynamics of the hydrogen mass fraction in the box in the cross section at half of the radius. Mass fractions of hydrogen: 1 – at the bottom of the box; 2 – at the exit from the PAR; 3 – at the top of the box; 4 – near the PAR entrance

На рис. 11 показано, что на отметках ниже входа в ПКРВ концентрация водорода практически не изменяется в силу отсутствия конвекции.

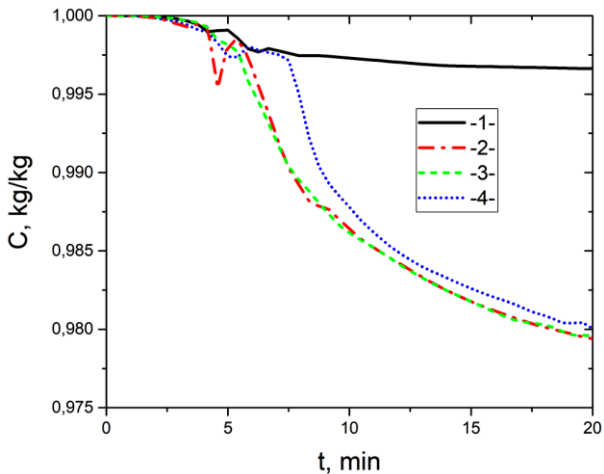


Рис. 12 – Динамика массовой доли неконденсируемых газов (водорода, кислорода и азота) в парогазовой смеси.

Общая массовая доля неконденсируемых газов: 1 – низ бокса; 2 – выход из ПКРВ; 3 – верх бокса; 4 – вход в ПКРВ
Fig. 12 – Dynamics of the mass fraction of non-condensable gases (hydrogen, oxygen and nitrogen) in a gas-vapor mixture. The total mass fraction of non-condensable gases: 1 – bottom of the box; 2 – exit from the PAR; 3 – top of the box; 4 – entrance in the PAR

На рис. 12 продемонстрировано накопление пара в основном в зоне циркуляции.

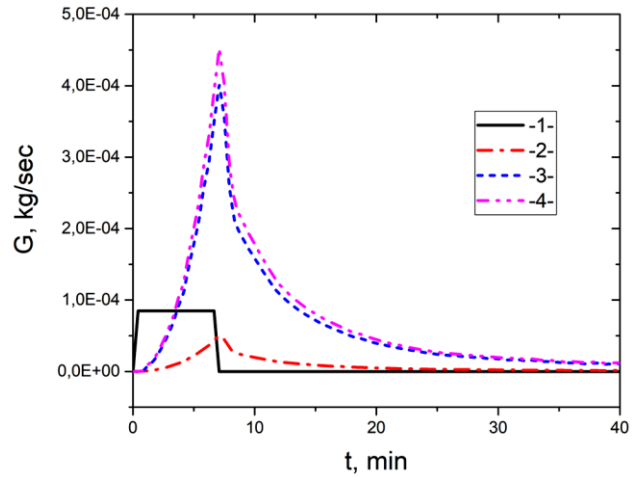


Рис. 13 – Динамика расходов компонентов: 1 – поступление водорода в бокс; 2 – скорость сжигания водорода; 3 – скорость сжигания кислорода; 4 – скорость генерации пара

Fig. 13 – The dynamics of flow components: 1 – hydrogen flow into the box; 2 – hydrogen burning rate; 3 – oxygen combustion rate; 4 – steam generation rate

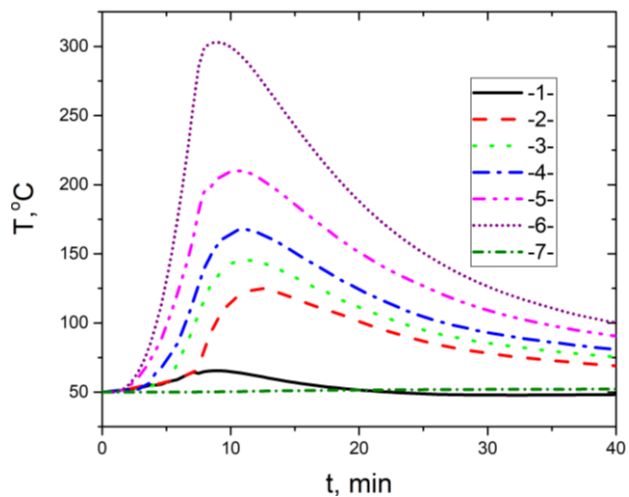


Рис. 14 – Динамика температуры смеси, катализатора и стенки бокса: 1 – низ бокса и 0,2 высоты бокса на половине радиуса бокса; 2 – отметка 0,4 высоты бокса на половине радиуса (вход в ПКРВ); 3 – отметка 0,6 высоты бокса на половине радиуса (верхняя отметка ПКРВ); 4 – верх бокса; 5 – выход из ПКРВ; 6 – катализатор; 7 – стенка бокса на половине высоты

Fig. 14 – Temperatures dynamics of mixture, catalyst and box walls: 1 – the bottom of the box and 0.2 height of box at half of the radius of the box; 2 – mark of 0.4 height of the box at half of the radius (entrance to RCC); 3 – mark 0.6 of the height of the box at half of the radius (upper mark of the PAR); 4 – the top of the box; 5 – the exit from the PAR; 6 – the catalyst; 7 – the box wall at half height

Полученные результаты позволяют сделать основной вывод – «выжигание» водорода происходит в боксе в зоне естественной циркуляции парогазовой смеси, то есть от нижней отметки входа в рекомбинатор до верхней отметки бокса. В нижней застойной зоне при отсутствии источника циркуляции газа



(например, источника мощности) наблюдается повышенная концентрация водорода, которая снижается чрезвычайно медленно. Водород в нижней части бокса медленно «размывается» вялой циркуляцией. Водяной пар, выделяемый в результате химической реакции, стратифицируется с максимумом вблизи верхнего окна ПКРВ и минимумом на нижней отметке бокса.

При наличии внешнего источника мощности в нижней части бокса (реализуется в натуральных условиях) динамика снижения концентрации водорода в этой зоне изменяется принципиально, что подтверждено повторным расчетом при наличии дополнительного источника тепловыделения (3 кВт) на нижней крышке бокса. В этом варианте расчета концентрация водорода практически гомогенно снижается по всей высоте бокса.

Обобщение экспериментальных данных по испытаниям ПКРВ

В формуле (13) было аналитически показано, что за пределами начальной стадии прогрева каталитических элементов при квадратичном законе гидравлического сопротивления ПКРВ расход ЕЦ газа пропорционален средней концентрации водорода C в степени $1/2$. Подстановка (13) в (4) приводит к следующей зависимости для производительности:

$$D = \text{const} C^{1.5} \quad (17)$$

На рис. 15 представлено сравнение экспериментальных данных по производительности рассматриваемой модели ПКРВ с результатами расчета (раздел «Многокомпонентная модель») для температуры в боксе 50°C , $k = 0,5$. Эти данные с определенной точностью описываются соотношением (17), и таким образом подтверждается методическая основа рассмотренной расчетной численной модели ПКРВ.

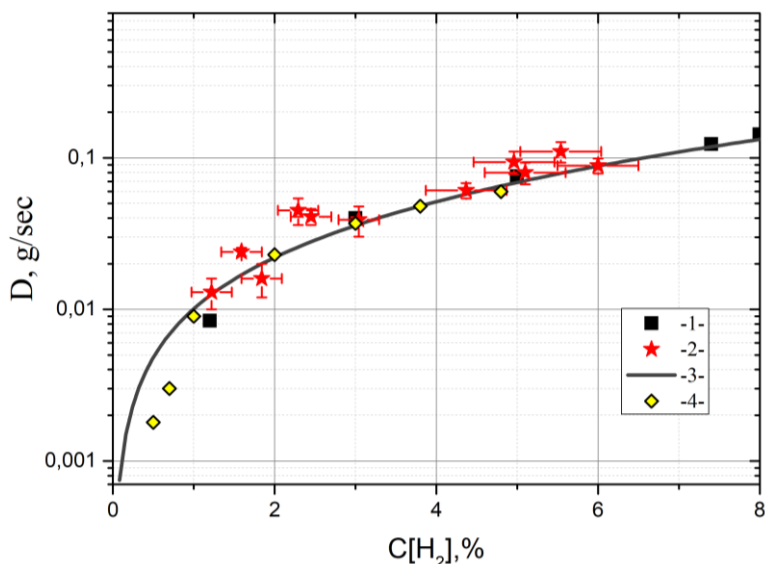


Рис. 15 – Производительность РВК-500: 1 – экспериментальные данные РЭТ; 2 – экспериментальные данные ФЭИ; 3 – эмпирическая расчетная зависимость РЭТ; 4 – расчетная модель настоящей работы

Fig. 15 – The productivity of RVK-500: 1 – the experimental data of RET; 2 – the experimental data of IPPE; 3 – the empirical calculated dependence of RET; 4 – the calculated model of the present work

По данным РЭТ (рис. 15) для модели РВК-500 получено следующее полуэмпирическое соотношение для производительности по водороду:

$$D = 0,34 C_m^{1.5} \quad (18)$$

или

$$D = 0,34 (C / 14)^{1.5} .$$

Здесь размерность производительности измеряется в кг/с; C_m – массовая доля водорода; C – объемная доля водорода.

С помощью формулы (4) и определенного на основе сопоставления опытных с расчетными данными коэффициента полноты рекомбинации, $k = 0,5$, полу-

чим соотношение для мгновенного расхода ЕЦ смеси через РВК-500:

$$G = 0,68 C_m^{1.5} \quad (19)$$

Последнее соотношение является замыкающей корреляцией для использования рассмотренной в разделе «Многокомпонентная модель» расчетной 4-х компонентной модели. При этом рекомендуемый диапазон коэффициента теплоотдачи в пучке катализатора составляет $25 \div 30 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

Результаты расчетов

Основанное на экспериментальных данных соотношение (19) далее применяется в расчетах для обоснования изменения концентрации водорода со временем и при работающем рекомбинаторе в экспе-



риментальном сосуде. Модель проверялась с помощью экспериментальных данных (см. рис. 4 и 5), соответствующих максимальной объемной концентрации водорода 5 %.

Приведены результаты расчетов и анализ поведения основных компонентов смеси после первоначальной подачи водорода за 100 с, 420 с и 1 000 с. Общее количество поданного водорода не менялось и составляло 35,7 г.

Расчеты при различной скорости подачи водорода проводились для адекватного понимания полученных экспериментальных данных, а именно, времени, за которое достигалась максимальная концентрация водорода и максимальная температура катализатора, а также времени отклика (задержка) катализатора при изменении концентрации поступающего водорода. Время отклика определяли как разность между максимумами по концентрации водорода и температуры катализатора. Поскольку подача водорода и скорость его перемешивания могут иметь достаточно большую погрешность (на данный момент нет определенной точности), расчеты с разной скоростью подачи водорода и последующее сравнение с экспериментальными данными могут дать область оцененных значений этого времени.

Подача водорода в интервале 100 с при расходе 0,357 г/с

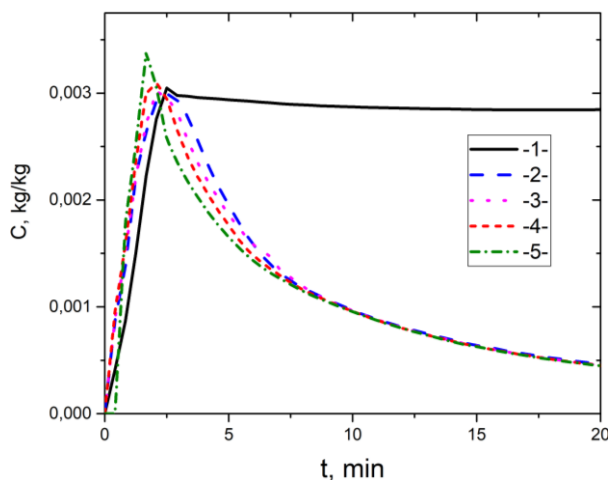


Рис. 16 – Динамика массовой доли водорода на различных отметках по высоте бокса на расстоянии половины радиуса бокса: 1 – низ бокса; 2 – вход в ПКРВ; 3 – половина высоты ПКРВ; 4 – выход из ПКРВ; 5 – верх бокса

Fig. 16 – Dynamics of the hydrogen mass fraction at different marks on the height of the box at a distance of half the radius of the box: 1 – the bottom of the box; 2 – input in the PAR; 3 – half of the height of the PAR; 4 – output from the PAR; 5 – the top of the box

Расчеты, представленные на рис. 16, подтверждают, что стратификации водорода в пределах зоны естественной циркуляции практически не наблюдается, а водород, находящийся ниже нижнего края рекомбинатора, практически не участвует в процессе рекомбинации и образует застойную зону. Различие кон-

центрации в зоне естественной циркуляции максимально при времени достижения максимальной концентрации в боксе и по оценкам не превышает 20 %.

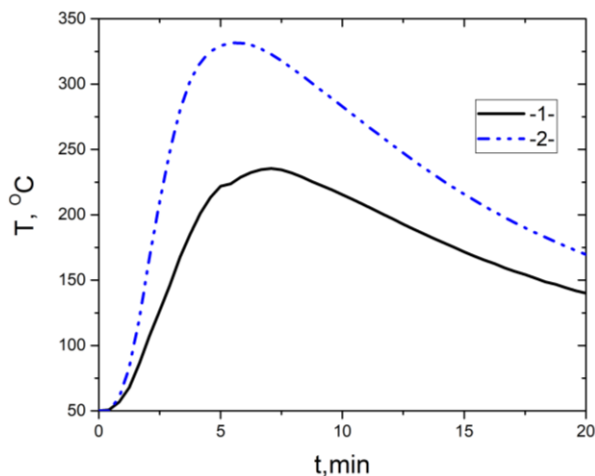


Рис. 17 – Динамика температуры: 1 – катализатора; 2 – газа на выходе из ПКРВ

Fig. 17 – Temperature dynamics: 1 – catalyst; 2 – gas at the outlet from the PAR

На рис. 17 явно демонстрируется временная задержка (около 250 с) максимума температур от момента прекращения подачи водорода.

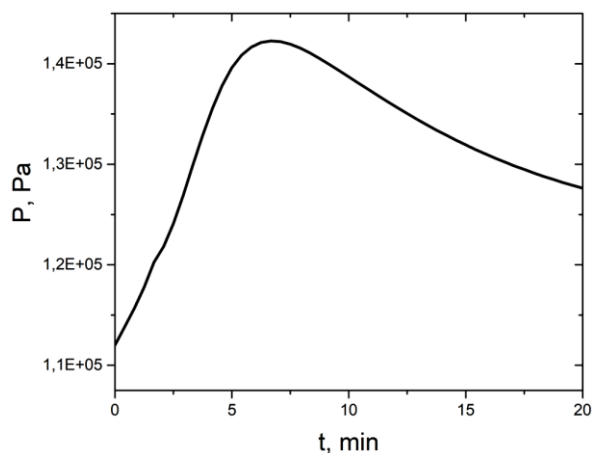


Рис. 18 – Динамика давления в боксе

Fig. 18 – Dynamics of the pressure in the box

На рис. 18 также показана временная задержка максимума давления с момента прекращения подачи водорода, который в принципе близок к максимумам по температуре.

Подача водорода в интервале 420 с при расходе 0,085 г/с

Численные результаты, представленные на рис. 19, явно демонстрируют значительную стратификацию водорода в пределах зоны естественной циркуляции в интервале времени подачи водорода (до 420 с).



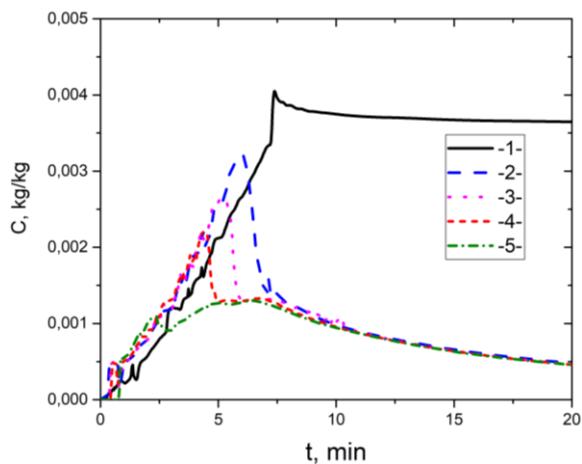


Рис. 19 – Динамика массовой концентрации водорода на различных отметках по высоте бокса на расстоянии половины радиуса бокса: 1 – низ бокса; 2 – вход в ПКРВ; 3 – половина высоты ПКРВ; 4 – выход из ПКРВ; 5 – верх бокса
Fig. 19 – Dynamics of the hydrogen mass fraction at different marks on the height of the box at a distance of half the radius of the box: 1 – the bottom of the box; 2 – entrance in the PAR; 3 – half of the height of the PAR; 4 – exit from the PAR; 5 – the top of the box

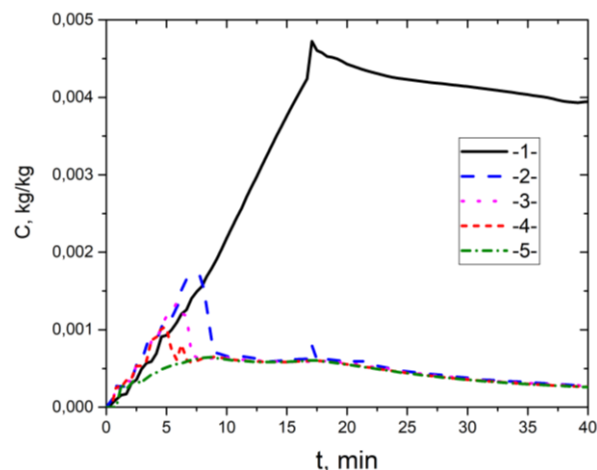


Рис. 21 – Динамика массовой доли водорода на различных отметках по высоте бокса на расстоянии половины радиуса бокса: 1 – низ бокса; 2 – вход в ПКРВ; 3 – половина высоты ПКРВ; 4 – выход из ПКРВ; 5 – верх бокса
Fig. 21 – Dynamics of the hydrogen mass fraction at different marks on the height of the box at a distance of half the radius of the box: 1 – the bottom of the box; 2 – entrance in the PAR; 3 – half of the height of the PAR; 4 – exit from the PAR; 5 – the top of the box

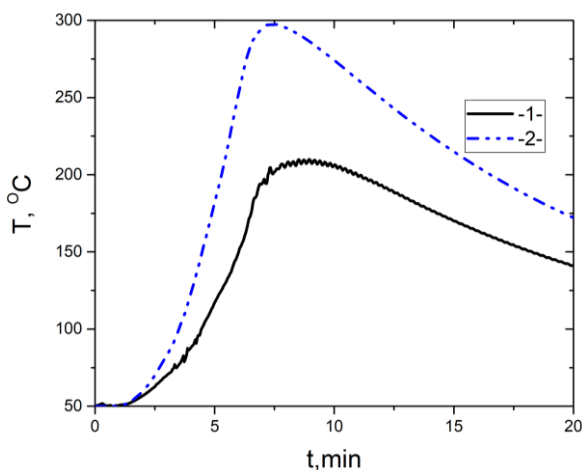


Рис. 20 – Динамика температуры: 1 – катализатора; 2 – газа на выходе из ПКРВ
Fig. 20 – Temperature dynamics: 1 – catalyst; 2 – gas at the outlet of the PAR

На рис. 20 демонстрируется временная задержка (около 150 с) максимума температур на катализаторе от момента прекращения подачи водорода.

Подача водорода в интервале 1 000 с при расходе 0,0357 г/с

При медленной подаче водорода максимальный расход ЕЦ ниже, чем при более быстрой подаче (за 100 с или 420 с), благодаря чему водород «накапливается» в нижней части бокса в больших количествах, чем при быстрой подаче. Следует отметить, что «накопление» является временным эффектом до момента переработки водорода в зоне ЕЦ и последующего «остывания» тепловой подушки зоны ЕЦ. Но такие расчеты в данной работе не проводились.

Сравнение экспериментальных данных по динамике температуры катализатора (см. рис. 6) и концентрации водорода (см. рис. 4) с результатами расчетов для разных времен подачи водорода дает качественное понимание скорости происходящих процессов. Экспериментальные данные по концентрации водорода показали, что максимальная концентрация водорода достигается на ~ 350 с после старта (начало подачи водорода).

Судя по результатам численных расчетов при времени подачи водорода в интервале 100 с смещения пика максимальной концентрации водорода после окончания его подачи не происходит. В то же время изменение концентрации водорода в зависимости от времени носит плавный характер (в пределах погрешности) для области естественной циркуляции.

Численные расчеты при времени подачи водорода в интервале 420 с и 1 000 с (рис. 21) также не выявили смещения пика максимальной концентрации водорода после окончания его подачи. Но при этом изменение концентрации водорода в зависимости от времени носит резкий и не характерный для экспериментальных данных характер. Следовательно, численные расчеты подтверждают, что подача водорода, включая перемешивание, могла длиться не более 2 мин, так как при более «медленной» подаче динамика изменения концентрации водорода носила бы резкий характер. Последнее связано со скоростью разогрева катализатора. В то же время функция динамики температуры катализатора носит плавный характер при любой скорости подачи водорода. Задержка достижения пика температуры по сравнению с пиком концентрации практически не заметна при такой медленной подаче водорода (рис. 22).



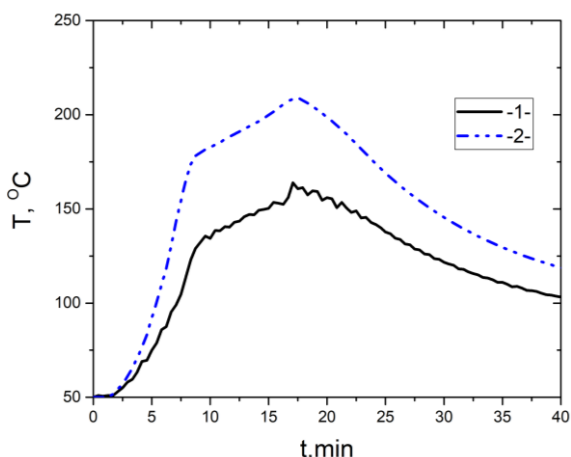


Рис. 22 – Динамика температуры: 1 – катализатора; 2 – газа на выходе из ПКРВ

Fig. 22 – Temperature dynamics: 1 – catalyst; 2 – gas at the outlet of the PAR

Среднее время задержки для концентрации $1 \div 2 \%$ достаточно велико и составляет $5 \div 10$ мин [14], а для концентрации $4 \div 6 \%$ – $2 \div 3$ мин (рассматриваемый в этой статье случай) [14]. При больших концентрациях задержка составляет около 1 минуты и менее, что говорит о быстром прогреве катализатора. Сам же пик концентрации при $4 \div 10 \%$ водорода появляется в пределах $6 \div 8$ мин после начала подачи, которая, напомним, длилась $1 \div 2$ мин [14]. При малых концентрациях пик достигался на 10 мин или даже позже.

Таким образом, время задержки появления пика концентрации водорода может быть связано с функцией отклика датчика водорода, которому, возможно, требуется несколько минут на разогрев, так как он использует такой же принцип дожигания водорода на катализаторе. Поскольку функцию отклика можно построить только на основе экспериментальных данных, детальное исследование этого эффекта будет проведено в последующих работах. В данной статье основное внимание было уделено скорости рекомбинации водорода после достижения его пиковой концентрации, так как знание скорости падения концентрации от пикового значения достаточно для определения производительности рекомбинатора и построения соответствующей инженерной модели.

Заключение

В контурных двухфазных кодах отраслевого и международного уровня RELAP-5-3D (США, Айдахо), TRACE (США, Лос-Аламос) и КОРСАР (Россия, НИТИ) имеется многокомпонентная модель парогазовой смеси с учетом переменного состава компонентов во времени и пространстве контура или объема. Модель основана на односкоростном равновесном приближении. Перенос концентраций компонентов (водород) обеспечивается только конвекцией. Аналогичная модель для вязкой среды имеется в CFD-кодах. Наличие данной модели является мето-

дологической основой для моделирования процесса рекомбинации водорода по схеме замещения компонентов (водорода и кислорода на водяной пар) с дополнительным тепловыделением в катализаторе.

Тестирование отмеченных контурных кодов показало получение вертикальной стратификации водорода и пара в атмосферной среде при полном отсутствии источников конвекции. Получены конкретные значения неравномерности концентрации водорода и пара по высоте модельного бокса.

Для кодов RELAP и КОРСАР (в рамках стандартного применения) разработана модель рекомбинации водорода на основе замещения компонентов водорода и кислорода на водяной пар с учетом дополнительного тепловыделения. Результаты тестирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными при испытаниях ПКРВ в герметичном боксе на естественной конвекции. Важнейшие параметры «настройки» модели – коэффициент полноты рекомбинации и коэффициент теплоотдачи в пучке катализатора: первый определяет мощность тепловыделения и темп спада концентрации; второй (совместно с первым) – температуру катализатора, что важно для определения границы воспламенения.

Численная модель ПКРВ обеспечивает расчет динамики локальной концентрации 4-х газовых компонентов смеси в боксе (контейменте), температур смеси, катализатора и стенок бокса, давления при подаче в бокс водорода, пара, воды от сплинкерной системы с учетом дополнительных внутренних источников тепловыделения.

Расчетным путем показано, что в идеальных условиях опытного бокса с ПКРВ (отсутствие дополнительных источников конвекции) интенсивное снижение концентрации водорода в боксе после прекращения его подачи имеет место в зоне естественной циркуляции парогазовой смеси: от нижней отметки ПКРВ до верхней отметки бокса. В нижней части бокса снижение концентрации происходит довольно медленно с низким уровнем температуры газа. Полученный результат является следствием принятой в кодах модели гидродинамики для смеси газов и может быть проверен экспериментально. В реальных условиях с наличием мощного источника тепловыделения в нижней части контейнента (реактор), вентиляции, работой сплинкерной системы, то есть при организации общей циркуляции в помещении, данный эффект отсутствует, что подтверждается проведенными расчетами.

По результатам сопоставления расчетных и опытных данных определена динамика концентрации, температуры катализатора и газа на выходе из ПКРВ. Установлено, что для испытанного типа ПКРВ расходный коэффициент полноты рекомбинации водорода (коэффициент «сжигания») составляет $40 \div 50 \%$ при реалистичном уровне коэффициента теплоотдачи в пучке катализатора ($20 \div 30$ Вт/м²К), гидравлическом сопротивлении ПКРВ и теплоемкости катализатора.

Недостаток контурных кодов RELAP и КОРСАР для моделирования химических реакций с замещением, в частности горения, связан с невозможностью программной реализации «оттока» конкретного газового компонента из расчетной ячейки (например, только водорода и кислорода из 4-х компонентной парогазовой смеси) в рамках стандартного использования кода. Соответственно, реализуется только алгоритм с разрывом контура на участке выхода из рекомбинатора с последующей сшивкой по расходам компонентов и температуре, с извне определенном суммарном расходе через ПКРВ. Данный алгоритм абсолютно устойчив. Однако в настоящее время только контурные коды обеспечивают сквозной расчет динамики аварийных процессов на энергоблоке, начиная от нейтронной физики и теплогидродинамики активной зоны до выхода водорода в помещения АЭС.

Список литературы

[1] International Atomic Energy Agency. Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1661, Vienna, IAEA, 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1661_Web.pdf (Дата обращения: 05.10.2017).

[2] Hydrogen in Water – Cooled Nuclear Power Reactors – IAEA and CEC, Vienna-Brussels, 1992. – EUR-14037.

[3] Autokatalytische Rekombinator syteme, Wasserstoffabbau SIEMENS AG(KWU), 1998; NDS9.

[4] Ferroni, F. Containment protection with hydrogen recombiners [Text] / F. Ferroni, L. Schiel, P. Collins // Atw. Atomwirtschaft, Atomtechnik. – 1994. – Vol. 39. – No 7. – P. 513–514.

[5] Девит, У.А. Разработка водородного рекомбинатора в компании «Атомик Энержи оф Кэнада, Лимитед» (AECL) / У.А. Девит [et al.]. – Семинар OECD/NEA/CSNI: «Реализация способов локализации водорода». Виннипег, 12–16 мая 1996.

[6] «Пассивный каталитический рекомбинатор водорода РВК-500». Технические условия РЭТ-101.00.000 ТУ, Москва, 2004.

[7] «Пассивный каталитический рекомбинатор водорода РВК-500, РВК-1000». Технические условия РЭТ-101.00.000 ТУ. – Москва, 2005.

[8] Anpilov, S.V. Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer in a Passive Autocatalytic Recombiner [Text] / S.V. Anpilov [et al.] // Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 60. – No 11. – P. 818–822.

[9] Blanchat, K. Analysis of hydrogen depletion using a scaled passive autocatalytic recombinder [Text] / K. Blanchat [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 1999. – Vol. 187. – P. 229–239.

[10] Reinecke, E. Studies on innovative hydrogen recombiners as safety devices in the containments of light water reactors [Text] / E. Reinecke // Nuclear Engineering and Design. – 2004. – Vol. 230. – P. 49–59.

[11] Meynet, N. Progress in PARs modeling for reactor application, 6th European Review meeting on Severe Accident Research [Text] / N. Meynet [et al.] // (ERMSAR-2013) Avignon (France), Palais des Papes, 2–4 October, 2013.

[12] Reinecke, E. Open issues in the applicability of recombinder experiments and modelling to reactor simulations [Text] / E. Reinecke [et al.] // Progress in Nuclear Energy. – 2010. – Vol. 52. – P. 136–147.

[13] Программа работ по устранению замечаний Ростехнадзора к пассивным каталитическим рекомбинаторам водорода (утверждена первым заместителем Генерального директора ОАО «Концерн Росэнергоатом» Асмоловым В.Г. в 2015 г.).

[14] Отчет АО «ГНЦ-РФ-ФЭИ» «Экспериментальные исследования по теме и обоснование проектных характеристик рекомбинаторов водорода производства ЗАО НПК «РЭТ». Инв. № 224/5.42.02-16/13141. Договор № 5296 от 18.07.2016 г. Этап 7»; Анализ выполненных испытаний по определению характеристик рекомбинаторов, Этап 1, Инв. № 224/5.42.02-15/8055 конф. г. Обнинск, 2016 г.

[15] Appel, C. An experimental and numerical investigation of homogeneous ignition in catalytically stabilized combustion of hydrogen/air mixtures over platinum [Text] / C. Appel [et al.] // Combustion and Flame. – 2002. – Vol. 128. – No 4. – P. 340–368

[16] Rinnemo, M. Experimental and Numerical Investigation of the Catalytic Ignition of Mixtures of Hydrogen and Oxygen on Platinum [Text] / M. Rinnemo [et al.] // Combustion and Flame. – 1997. – Vol. 111. – No 4. – P. 312–326.

[17] Schefer, R.W. Catalyzed Combustion of H₂/Air Mixtures in a Flat Plate Boundary Layer: II. Numerical Model [Text] / R.W. Schefer // Combustion and Flame. – 1982. – Vol. 45. – P. 171–190.

[18] Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике [Текст] / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.

[19] Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции НП-040-02. – Москва 2002.

[20] Отчет «Обеспечение водородной взрывобезопасности на АЭС с корпусными реакторами под давлением. Современное состояние вопроса», АО «ВНИИАЭС», 2017 / Соловьев С.Л., Михальчук А.В., Авдеенков А.В.

[21] «Пассивные каталитические рекомбинаторы водорода РВК-500, РВК-1000», РЭТ-111.00.000 ТУ, 2007.

References

[1] Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants (Smyagchenie opasnostei, svyazannykh s vodorodom pri tyazhelykh avariyaх na atomnykh elektrostantsiyakh), IAEA-TECDOC (IAEA), 2011;1661. Available on: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1661_Web.pdf (05.10.2017) (in Eng.).



[2] Hydrogen in Water – Cooled Nuclear Power Reactors (Vodorod v vodoohlazhdaemykh Jadernykh Jenergeticheskikh Reaktorah), IAEA and CEC, 1992; EUR-14037 (in Eng.).

[3] Autocatalytic Recombinant Systems (Avtokataliticheskie Rekombinatsionnye Systemy). *Wasserstoffabbau SIEMENS AG(KWU)*, 1998; NDS9 (in Deu.).

[4] Ferroni F., Schiel L., Collins P. Containment protection with hydrogen recombiners (Protivoavariinaya zashchita v rekombinatorakh vodoroda). *Atw. Atomwirtschaft, Atomtechnik*, 1994; 39(7)513–514 (in Deu.).

[5] Devit U.A., Koroll J.N., Luazel'-Sitar J. Development of a hydrogen recombiner in the "Atomic Energy of Canada Limited" company (AECL) (Razrabotka vodorodnogo rekombinatora v kompanii "Atomik Enerzhii of Kanada Limited"). *Workshop OECD/NEA/CSNI "The Implementation of hydrogen mitigation techniques"*, 1996; NEA/CSNI/R(96)9 (in Eng.).

[6] Passive catalytic hydrogen recombiner RVK-500 (Passivnyi kataliticheskii rekombinator vodoroda RVK-500). *Tekhnicheskie usloviya RET-101.00.000*, 2004; (in Russ.).

[7] Passive catalytic hydrogen recombiner RVK-500, RVK-1000 (Passivnyi kataliticheskii rekombinator vodoroda RVK-500, RVK-1000). *Tekhnicheskie usloviya RET-101.00.000*, 2005 (in Russ.).

[8] Anpilov S.V., Grigoruk D.G., Kondratenko P.S., Khristenko E.B., Chizhov M.E. Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer in a Passive Autocatalytic Recombiner (Matematicheskoe modelirovanie teplo-masso perenosa v passivnom avtokataliticheskom rekombinatore). *Thermal Engineering*, 2013; 60(11)818–822 (in Russ.).

[9] Blanchat K. et al. Analysis of hydrogen depletion using a scaled passive autocatalytic recombiner (Analiz udaleniya vodoroda pri pomoschi masshabiruemykh passivnykh rekombinatorov vodoroda). *Nuclear Engineering and Design*, 1999; 187:229–239 (in Eng.).

[10] Reinecke E. Studies on innovative hydrogen recombiners as safety devices in the containments of light water reactors (Issledovanie perspektivnykh rekombinatorov vodoroda kak sredstvo obespecheniya bezopasnosti kontainmentov legko-vodyanykh reaktorov). *Nuclear Engineering and Design*, 2004; 230:49–59 (in Eng.).

[11] Meynet N. et al. Progress in PARs modeling for reactor application, 6th European Review meeting on Severe Accident Research (Progress v modelirovanii PKRV dlya reaktornykh prilozhenii). *ERMSAR-2013*, Avignon (France), Palais des Papes, 2–4 October, 2013 (in Eng.).

[12] Reinecke E. et al., Open issues in the applicability of recombiner experiments and modelling to reactor simulations (Otkrytye voprosy primenimosti experimentov i modelirovaniya s rekombinatotami k reaktornomu modelirovaniyu). *Progress in Nuclear Energy*, 2010; 52:136–147 (in Eng.).

[13] Program of work to eliminate comments from Rostekhnadzor to passive catalytic hydrogen recombiners (Approved by First Deputy Director General of OJSC "Rosenergoatom Concern" Asmolov V.G.) (Programma rabot po ustraneniuyu zamechaniy

Rostekhnadzora k passivnym kataliticheskim rekombinatoram vodoroda (Utverzhdena pervym zamestitel'em General'nogo direktora OAO "Kontsern Rosenergoatom" Asmolovym V.G.), 2015 (in Russ.).

[14] Report of JSC "SSC RF-IPPE" on "Experimental research and justification of the design characteristics of hydrogen recombiners produced by ZAO NPK «RET» No 224/5.42.02-16/13141, contract No 5296 of July 18, 2016, Stage 7"; Analysis of performed tests to determine the characteristics of recombiners, Stage 1, No. 224/5.42.02-15/8055 (Otchet AO "GNC RF-FEI" po teme "Jeksperimental'nye issledovaniya i obosnovanie proektnykh harakteristik rekombinatorov vodoroda proizvodstva ZAO NPK "RET" №224/5.42.02-16/13141, dogovor №5296 Jetap 7"; Analiz vypolnennykh ispytaniy po opredeleniyu harakteristik rekombinatorov, Jetap 1, №224/5.42.02-15/8055), 2016 (in Russ.).

[15] Appel C., Mantzaras J., Schaeren R., Bombach R., Inauen A., Kaeppli B., Hemmeling B., Stamponi A. An experimental and numerical investigation of homogeneous ignition in catalytically stabilized combustion of hydrogen/air mixtures over platinum (Experimental'noe i chislennoe issledovanie gomogenogo vosplamneniya pri kataliticheski stabilizirovannom szhiganiy smesi vodoroda/vozdushnoi smesi nad platinoi). *Combustion and Flame*, 2002; 128(4)340–368 (in Eng.).

[16] Rinnemo M., Deutchmann O., Behrendt F., Kasemo B. Experimental and Numerical Investigation of the Catalytic Ignition of Mixtures of Hydrogen and Oxygen on Platinum (Experimental'noe i chislennoe issledovanie kataliticheskogo szhiganiya smesi vodoroda I kisloroda na platine). *Combustion and Flame*, 1997; 111(4)312–326 (in Eng.).

[17] Schefer R.W. Catalyzed Combustion of H₂/Air Mixtures in a Flat Plate Boundary Layer: II. Numerical Model (Katalizirovannoe szhiganiye vodorodo/vozdushnykh smesei v ploskom pogranichnom sloe: II. Chislennaya model'). *Combustion and Flame*, 1982; 45:171–190 (in Eng.).

[18] Frank-Kamenetskii D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics (Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike). Moscow: Nauka Publ., 1987; 502 (in Russ.).

[19] Ensuring hydrogen explosion protection at the Nuclear Power Plant (Pravila obespecheniya vodorodnoi vzryvozashchity na atomnoi stancii). 2002; NP-040-02 (in Russ.).

[20] Solov'ev S.L., Mikhal'chuk A.V., Avdeenkov A.V. Report of "Ensuring hydrogen explosion protection at the NPP with the boiling water reactor. Current state of the issue" (Otchet "Obespechenie vodorodnoi vzryvobezopasnosti na AES s korpusnymi reaktorami pod davleniem. Sovremennoe sostoyanie voprosa"). JSC "VNIIAES", 2017 (in Russ.).

[21] Passive catalytic hydrogen recombiner RVK-500, RVK-1000 (Passivnyi kataliticheskii rekombinator vodoroda RVK-500, RVK-1000). *Tekhnicheskie usloviya RET-111.00.000*, 2007 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

