

---

---

УДК 621.039,519.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПАССИВНОГО АВТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕКОМБИНАТОРА В ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕМ ПРИБЛИЖЕНИИ

© 2022 г. А. А. Канаев<sup>1</sup>, \*, В. Ю. Готов<sup>1</sup>, А. Е. Киселев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

\*e-mail: kanaev@ibrae.ac.ru

Поступила в редакцию 16.02.2022 г.

После доработки 14.04.2022 г.

Принята к публикации 18.04.2022 г.

В работе представлены результаты численного моделирования эксперимента OECD/NEA HYMERES HP2\_1 на установке PANDA, направленного на изучение теплового эффекта работы ПКРВ на перемешивание атмосферы в объеме установки с использованием ПрЭВМ САВАРЕТ\_SC1. В основе программного комплекса лежит одноименная численная методика КАБАРЕ, позволяющая проводить расчеты турбулентных течений на сетках с неполным разрешением спектра турбулентных пульсаций без использования настроечных параметров (Implicit LES-приближение). Течение внутри имитатора ПКРВ рассчитывалось в явном виде с использованием упрощенной модели нагревательного модуля и корпуса. Получено хорошее совпадение результатов расчета переходного процесса с экспериментальными данными, что свидетельствует об эффективности такого подхода. Для моделирования работы реального ПКРВ в комплексных экспериментах модель имитатора ПКРВ была дополнена простой моделью рекомбинации водорода в каталитическом модуле ПКРВ на основе эмпирических корреляций. С помощью обновленной модели ПКРВ был проведен расчетный анализ эксперимента OECD/NEA THAI с ПКРВ на установке THAI (THAI HR-1).

*Ключевые слова:* PLES, схема КАБАРЕ, вычислительная гидродинамика, пассивные каталитические рекомбинаторы водорода, ПКРВ

DOI: 10.31857/S0002331022040070

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения водородной безопасности на большинстве АЭС с водо-водяным реактором предусмотрены системы аварийного удаления водорода. К таким системам относятся пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ), работающие по принципу беспламенной рекомбинации водорода с кислородом на катализаторе без дополнительного подвода энергии и без управляющих сигналов на включение.

Запуск ПКРВ происходит, когда локальная концентрация водорода на входном торце устройства превысит некоторое пороговое значение. Реакция рекомбинации сопровождается выделением тепла и продолжается до тех пор, пока в атмосфере имеется достаточное количество водорода и кислорода. Локальный нагрев газа в результате рекомбинации водорода вызывает естественную конвекцию, которая способствует перемешиванию атмосферы (тепловой эффект).

Условия, в которых ПКРВ функционирует, могут различаться в зависимости от сценария и этапа тяжелой аварии. Для исследования характеристик работы ПКРВ в разных условиях необходимы комплексные испытания в крупномасштабных экспериментальных установках и теоретический анализ с помощью современных вычислительных инструментов CFD-класса.

В ИБРАЭ РАН для проведения расчетного анализа задач водородной безопасности разрабатывается ПрЭВМ CABARET-SC1, предназначенная для детального трехмерного моделирования задач нестационарной газовой динамики в вихреразрешающем приближении. В основе программного комплекса лежит одноименная методика КАБАРЕ [1], позволяющая проводить расчеты турбулентных течений на сетках с неполным разрешением спектра турбулентных пульсаций без использования настроечных параметров и эмпирических корреляций.

Значительный объем валидационной базы для кода CABARET-SC1 представлен экспериментами международных проектов АЯЭ ОЭСР ERCOSAM-SAMARA, HYMERES, HYMERES-2 [2–4]. Эти проекты представляют собой исследования, частично направленные на изучение формирования и разрушения стратификации водорода, в том числе при работе систем безопасности.

В работе представлены результаты численного моделирования эксперимента АЯЭ ОЭСР HYMERES HP2\_1 [5] на установке PANDA, направленного на изучение теплового эффекта работы ПКРВ на перемешивание атмосферы в объеме установки с использованием ПрЭВМ CABARET\_SC1. Течение внутри имитатора ПКРВ рассчитывалось в явном виде с использованием упрощенных моделей нагревательного модуля и корпуса. Получено хорошее совпадение результатов расчета переходного процесса с экспериментальными данными, что свидетельствует об эффективности такого подхода. Для моделирования работы реального ПКРВ в комплексных экспериментах модель имитатора ПКРВ была дополнена простой моделью рекомбинации водорода в каталитическом модуле ПКРВ на основе эмпирических корреляций. С помощью обновленной модели ПКРВ был проведен расчетный анализ эксперимента OECD/NEA TNA1 с ПКРВ на установке TNA1 (TNA1 HR-1) [6].

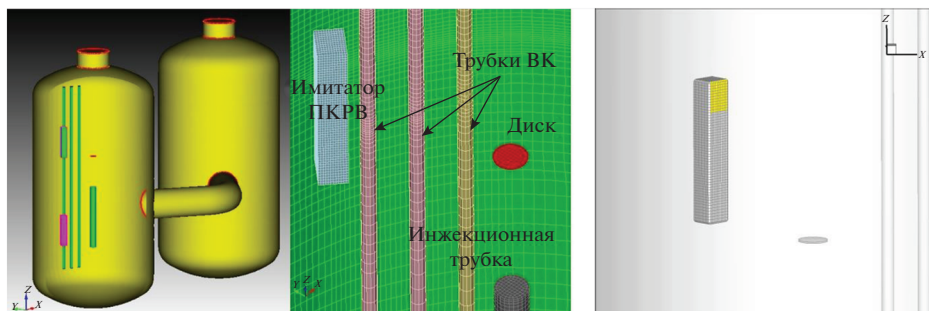
#### ПОСТАНОВКА И СЦЕНАРИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА РАБОТЫ ПКРВ

Эксперимент HP2\_1\_2 проекта АЯЭ ОЭСР HYMERES, проведенный на швейцарской экспериментальной установке PANDA, направлен на исследование влияния теплового эффекта работы ПКРВ на динамику создания и разрушения обогащенного гелием слоя струей пара в присутствии пристеночной конденсации [5].

Экспериментальная установка PANDA представлена двумя герметичными теплоизолированными емкостями высокого давления, соединенными трубопроводом, общим объемом 184 м<sup>3</sup>, высотой 8 м каждый и диаметром цилиндрической части 4 м. В центре Емкости 1 установки расположена инжекционная трубка диаметром 0.2 м, через которую пар и гелий поступают в установку. Инжектируемая струя попадает на горизонтальный круглый диск для предотвращения разрушения образующейся стратификации легкого газа свободной струей пара. Вертикальный конденсатор (ВК), состоящий из трех вертикальных труб длиной 6 м, установленных вблизи стенки Емкости 1, служит для имитации конденсации пара на стенках защитной оболочке в постулируемой аварии на АЭС. Конденсация пара на ВК индуцирует конвекцию, которая может влиять на распределение гелия в установке и усиливать перемешивание атмосферы, вызванное восходящими из имитаторов ПКРВ газовыми шлейфами. В Емкости 1 размещены два идентичных имитатора ПКРВ на высоте 2.09 м и 5 м над дном емкости выходными отверстиями в сторону оси емкости. Конструкция имитаторов ПКРВ основана на реальной модели ПКРВ Areva Framatome FR90/1-150. Имитатор ПКРВ представляет собой корпус из нержавеющей стали с установленным в нижней части корпуса нагревательным модулем. Этот модуль имитирует зону нагрева в области каталитического модуля в реальном ПКРВ.

Сценарий основного этапа эксперимента состоял из четырех этапов:

- Этап 1: инъекция пара с расходом 30 г/с при температуре 150°С в течение 500 с;



**Рис. 1.** Геометрия расчетной модели эксперимента NP2\_1\_2 (слева); Сеточная модель имитатора ПКРВ. Выходное сечение выделено желтым цветом (справа).

- Этап 2: инъекция смеси пара при расходе 30 г/с и гелия при расходе 3.2 г/с, при температуре смеси 150°C в течение 500 с. Верхний имитатор ПКРВ был активирован с мощностью 6 кВт;
- Этап 3: инъекция гелия была прекращена, в то время как инъекция пара продолжилась с расходом 30 г/с при температуре инъекции 150°C в течение 1000 с. Верхний имитатор ПКРВ продолжил работу с мощностью 6 кВт;
- Этап 4: инъекция пара была прекращена, мощность верхнего имитатора ПКРВ линейно уменьшалась до значения 1 кВт на момент окончания эксперимента.

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА РАБОТЫ ПКРВ

В расчетах использовалась гексаэдральная блочно-структурированная сетка с числом ячеек 3.2 млн (рис. 1, слева). Имитатор ПКРВ моделировался в виде прямоугольного блока с входным и выходным окнами (рис. 1, справа). Число ячеек в имитаторе ПКРВ составляло 7920.

В начальный момент времени Емкости заполнены смесью воздуха и пара при давлении 1.317 бар. Температура и состав смеси задавались путем аппроксимации экспериментальных данных.

Теплоизоляция экспериментальной установки не моделировалась. На внешних границах стальных стен Емкостей задавалось условие 3-его рода  $q = h(T - T_{ref})$  с коэффициентом теплоотдачи, полученным по результатам измерений теплотерм установки [11]  $h = 5.77 \times 10^{-3} T[K] - 1.66$ , и референтной температурой  $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ .

Для моделирования конденсации пара на ВК использовались экспериментальные данные по массе конденсата, поступающего в конденсатосборник, и температурам трубок ВК.

Как показал опыт моделирования экспериментов на установке PANDA [2–4], теплообмен излучением оказывает значительное влияние на температуру газовой смеси и на формирование/разрушение концентрационной стратификации. В условиях высокого паросодержания (50 мол. %) атмосфера установки является оптически плотной, поэтому для моделирования переноса тепла излучением использовалась диффузионная модель лучистой теплопроводности Росселанда. Средний по Росселанду коэффициент поглощения водяного пара был выбран равным  $120 \text{ атм}^{-1} \text{ м}^{-1}$  [12], для коэффициента черноты стен использовалось табличное значение 0.8 для нержавеющей стали.

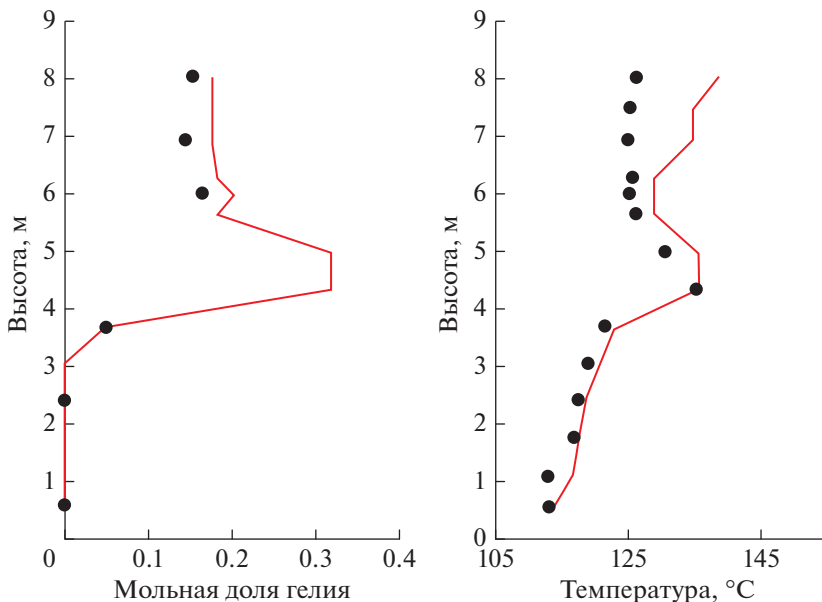


Рис. 2. Распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в момент времени 1000 сек.

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ИМИТАТОРА ПКРВ

Течение газовой среды внутри имитатора ПКРВ вычисляется явно и представляет собой течение, вызванное естественной конвекцией через нагревательный модуль, моделируемый как пористая среда с заданным гидравлическим сопротивлением. Изменение давления на участке нагревательного модуля можно представить в виде

$$\partial_z P = 0.5 K_{loss} \rho u^2, \quad (1)$$

где  $K_{loss}$ ,  $m^{-1}$  – коэффициент гидравлических потерь;  $u$ , м/с – среднemasсовая скорость в поперечном сечении имитатора ПКРВ. Коэффициент гидравлических потерь для аналогичного имитатора ПКРВ был оценен численно ( $\approx 20 m^{-1}$ ) в экспериментах MERCO-3/4 на установке MISTRA [7].

На стенках корпуса имитатора ПКРВ задается условие прилипания. Часть тепла, выделяемого в нагревательном модуле, поступает на корпус имитатора ПКРВ путем конвективного и лучистого теплообмена. Тепловая инерция корпуса и теплопотери с его поверхности влияют на нагрев газа и режим конвекции внутри ПКРВ. Т.к. толщина корпуса составляет всего 2 мм, то для повышения эффективности расчетной модели корпус ПКРВ моделировался без сеточного разрешения. На гранях сетки, попадающих на корпус ПКРВ, задавалось условие прилипания. Этим граням присваивались эффективная масса  $\delta m_{Si}$  и теплоемкость  $C_{Si}$ , соответствующие стальным стенкам корпуса, и задавались двойные тепловые потоки  $Q_{in}$  и  $Q_{out}$  для моделирования теплообмена на внутренней и внешней поверхности корпуса. Локальная температура корпуса вычислялась из балансного уравнения

$$\delta m_{Si} d_t (C_{Si} T) = Q_{in} - Q_{out}. \quad (2)$$

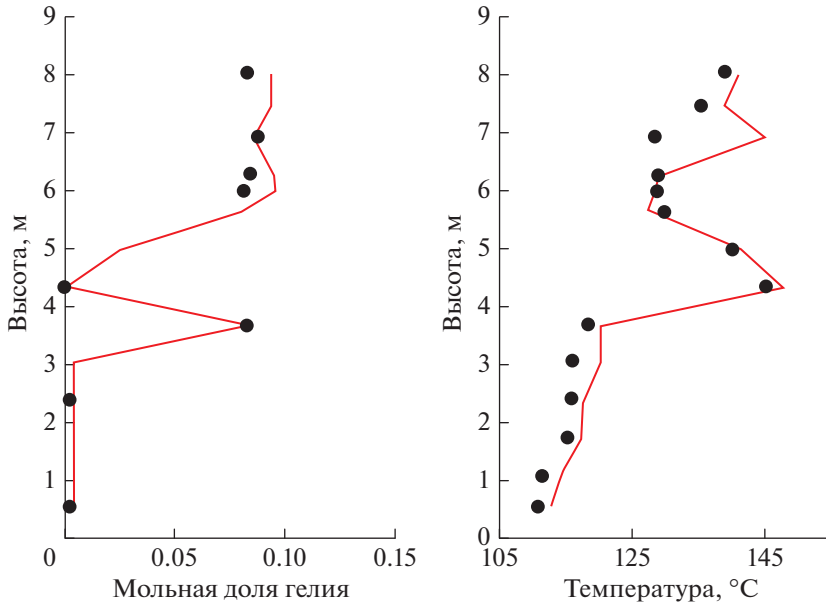


Рис. 3. Распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в момент времени 2000 сек.

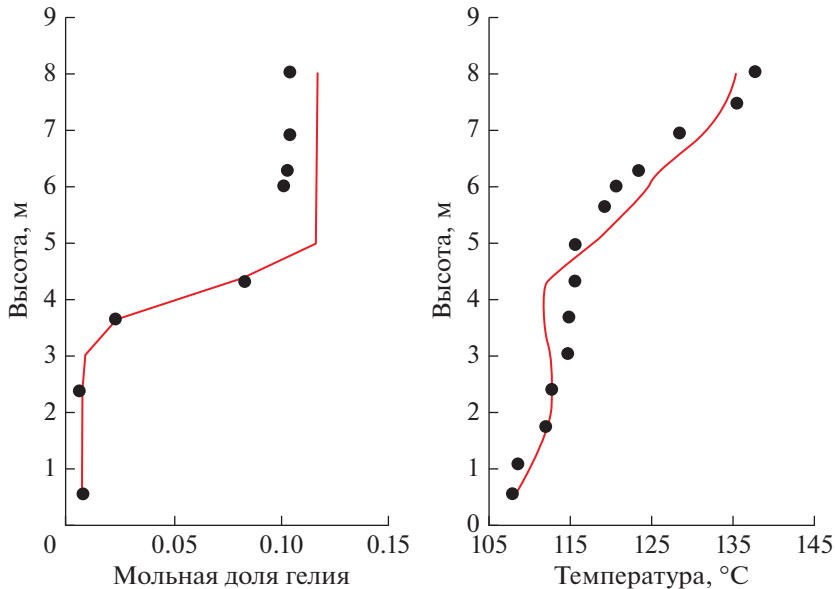


Рис. 4. Распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в момент времени 3000 сек.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА РАБОТЫ ПКРВ

На рис. 2–5 показано рассчитанное распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в моменты времени 1000 сек, 2000 сек, 3000 сек и 8000 сек в сравнении с экспериментальными данными. Поступающая горячая смесь пара с гелием из-за вы-

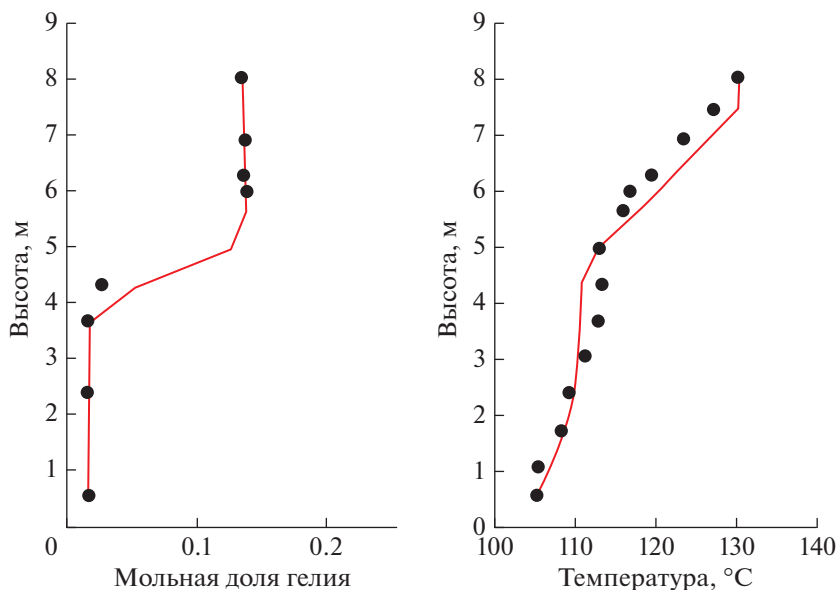


Рис. 5. Распределение гелия и температуры по высоте Емкости 1 в момент времени 8000 сек.

сокой плавучести аккумулируется в верхней половине Емкости 1, вытесняя холодный газ в нижнюю половину Емкости 1 и Емкости 2. В Емкости 1 формируется концентрационная и температурная стратификация. Граница стратификации опускается до уровня соединительной трубы, в результате чего обогащенный гелием газ поступает в верхнюю половину Емкости 2. После прекращения инъекции ( $t = 3000$  сек) температура газа в верхней половине Емкости 1 медленно падает из-за тепловых потерь на стенках, граница стратификации немного поднимается и переток гелия в Емкость 2 прекращается.

В результате численного анализа было подтверждено, что тепловой эффект имитатора ПКРВ, расположенного в верхней части Емкости 1 в области стратификации, не приводит к разрушению стратификации и гомогенизации атмосферы установки, а лишь обеспечивает эффективное перемешивание газовой смеси внутри стратифицированного слоя.

На рис. 6 показано сравнение температуры газа на входе и выходе имитатора ПКРВ. Как видно из рисунка, упрощенная модель имитатора ПКРВ хорошо воспроизводит нагрев газа, что подтверждает перспективность ее использования для моделирования реального ПКРВ.

Предлагаемый комбинированный подход с вихреразрешающим моделированием турбулентных течений в атмосфере экспериментальной установки в совокупности с упрощенной моделью имитатора ПКРВ продемонстрировал свою эффективность — распределение газовой смеси по составу с высокой точностью совпало с экспериментом. Небольшие локальные отклонения объясняются упрощенной моделью ВК и отмечаемыми экспериментаторами завышенными теплопотерями в области люка.

## ПОСТАНОВКА И СЦЕНАРИЙ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ПКРВ

Эксперименты с ПКРВ, проведенные на немецкой экспериментальной установке ТНАИ в рамках проекта АЯЭ ОЭСР ТНАИ [6], были направлены на получение данных

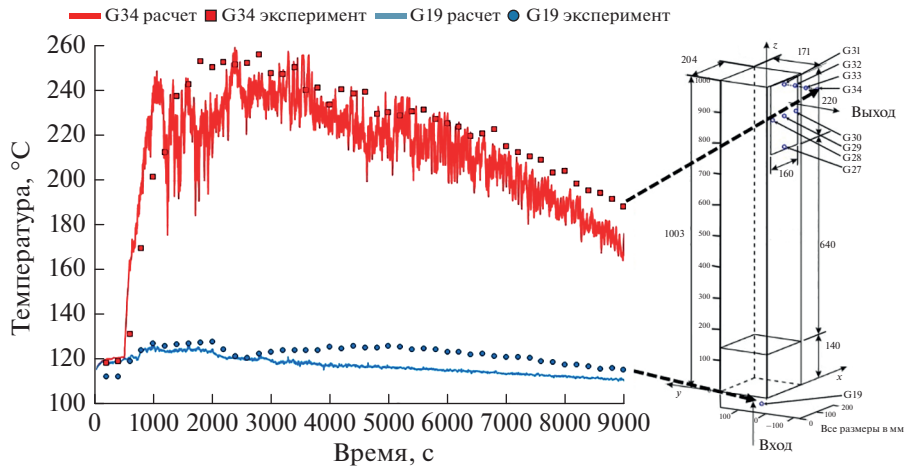


Рис. 6. Температура газа на входе и выходе из имитатора ПКРВ.

для валидации и разработки моделей ПКРВ для CFD и LP кодов, используемых для анализа теплогидравлики защитной оболочки АЭС.

В эксперименте ТНАИ HR-2 исследовалась работа ПКРВ Areva Framatome FR-380 с уменьшенной вдвое шириной металлического корпуса и с 19 каталитическими пластинами вместо 38. ПКРВ был закреплен на внешней стенке внутреннего металлического цилиндра, установленного по центру в нижней части Емкости установки ТНАИ объемом 60 м<sup>3</sup>. В начале испытаний Емкость заполнялся сухим воздухом при атмосферном давлении (1 бар) и комнатной температуре (27.9°C). Затем водород поступал через кольцевую линию подачи, установленную под внутренним цилиндром, со средним расходом 0.157 г/с. В течение первых 20 минут концентрация водорода на входе ПКРВ постепенно увеличивалась от 0 до 6 мол. %. ПКРВ начал работать через 7 минут, когда концентрация на входе достигла значения 1.15 мол. %. В момент старта ПКРВ расход подаваемого водорода был увеличен вдвое (до 0.306 г/с). Когда содержание водорода в атмосфере установки снизилось до < 0.8 мол. %, начался второй этап эксперимента. Накачка водорода была возобновлена и продолжалась до момента, пока не произошло воспламенение водорода внутри ПКРВ. В настоящей работе обсуждаются результаты моделирования первого этапа эксперимента.

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ПКРВ

В расчетах использовалась гексаэдральная блочно-структурированная сетка с числом ячеек 1.715 млн (рис. 7). ПКРВ моделировался в виде прямоугольного блока с входным и выходными окнами. Число ячеек в ПКРВ составляло 11220.

На стенках Емкости задавалось условие 3-го рода  $q = h(T - T_{ref})$  с коэффициентом теплоотдачи 50 Вт/(м<sup>2</sup>К) [13] и референтной температурой, равной начальной температуре стенок 27.9°C.

Подача водорода в эксперименте осуществлялась через кольцо с 56 отверстиями Ø 3 мм. В расчетах использовалась упрощенная модель кольцевой линии подачи водорода. Кольцо было поднято на уровень перехода струи в факел  $\Delta z = M^{3/4} / B^{1/2} = 0.15$  м, что позволило увеличить эффективный диаметр струи в несколько раз. При моделировании инжекция происходила через кольцевую поверхность толщиной 1 см с задан-

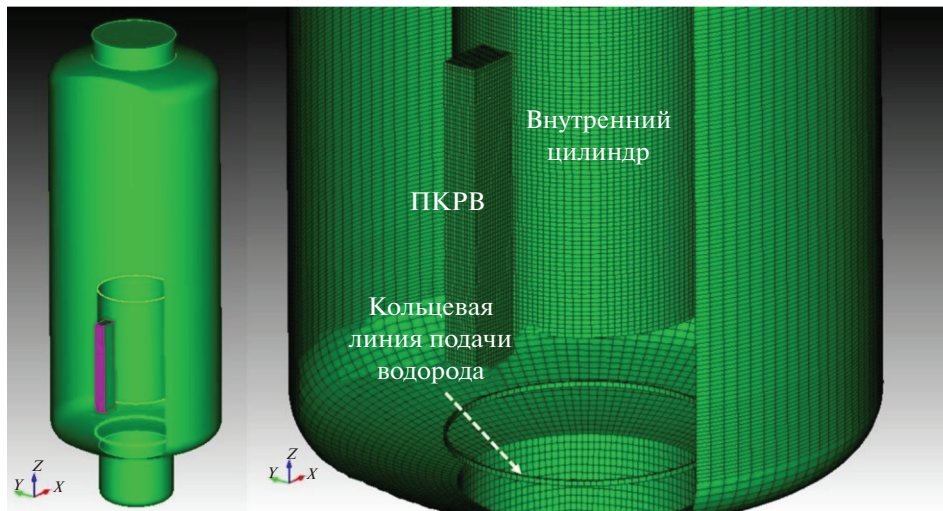


Рис. 7. Геометрическая и сеточная модель установки ТНА1.

ным расходом. Сравнение концентраций водорода до старта ПКРВ с экспериментом показало, что такое упрощение допустимо.

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПКРВ

Для моделирования работы реального ПКРВ в комплексных экспериментах модель имитатора ПКРВ была дополнена простой моделью рекомбинации водорода в каталитическом модуле ПКРВ на основе эмпирических корреляций.

Изменение средней температуры каталитических элементов  $\bar{T}_{cat}$  описывается дифференциальным уравнением

$$m_{cat} \frac{d(C_{cat} \bar{T}_{cat})}{dt} = Q_{heat} - Q_{fluid} - Q_{rad}, \quad (3)$$

где  $C_{cat} = C_{cat}(\bar{T}_{cat})$  – удельная теплоемкость материала каталитических элементов;  $m_{cat}$  – суммарная масса каталитических элементов.

Теплота, выделяющаяся в ходе поверхностной реакции рекомбинации водорода, приводит к увеличению температуры каталитических элементов

$$Q_{heat} = \dot{r}_{H_2} \Delta H_{H_2}, \quad (4)$$

где  $\dot{r}_{H_2}$  – скорость рекомбинации водорода, кг/с;  $\Delta H_{H_2} = 1.41 \times 10^8$  Дж/кг – удельная теплота сгорания водорода.

Теплоотвод в каталитическом блоке осуществляется путем конвективного теплообмена с газом

$$Q_{fluid} = \bar{h}_{cat} \cdot A_{cat}^{(sum)} \cdot (\bar{T}_{cat} - \bar{T}_g) \quad (5)$$

и переноса тепла излучением с поверхности каталитических элементов на корпус реактора

$$Q_{rad} = \bar{\epsilon} \sigma A_{cat}^{(out)} (\bar{T}_{cat}^4 - \bar{T}_{box}^4). \quad (6)$$



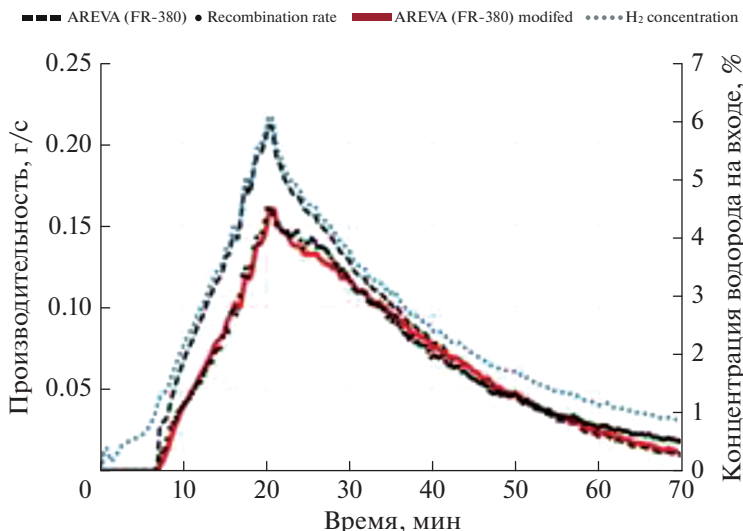


Рис. 8. Производительность ПКРВ FR-380 и концентрация водорода на входе ПКРВ в эксперименте ТНАИ HR-2.

Здесь  $\bar{h}_{cat}$  – средний коэффициент теплоотдачи с поверхности каталитических элементов к газу;  $A_{cat}^{(sum)}$  – суммарная площадь поверхности каталитических элементов;  $\bar{T}_g$  – средняя температура газа в каталитическом блоке;  $A_{cat}^{(out)}$  – внешняя поверхность каталитического блока;  $\bar{T}_{box}$  – средняя температура корпуса рекомбинатора. Приведенная степень черноты при лучистом теплообмене в системе двух серых тел вычисляется по формуле

$$\bar{\epsilon} = \left( 1/\epsilon_{cat} + (1/\epsilon_{box} - 1) A_{cat}^{(out)}/A_{box} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $\epsilon_{cat} = 0.8$  [8] и  $\epsilon_{box} = 0.25$  [8] – степень черноты катализатора (платины) и корпуса рекомбинатора (нержавеющая сталь);  $A_{box}$  – площадь поверхности корпуса рекомбинатора.

Коэффициент гидравлического сопротивления в области каталитических пластин и коэффициент теплоотдачи взяты из работы [9].

Производительность рекомбинаторов AREVA Framatome (модель FR-380) описывается эмпирической корреляцией [10]

$$\dot{r}_{H_2} = \eta(k_1 P + k_2) \min(X_{H_2}, 2X_{O_2}, 8) \tanh(X_{H_2} - X_{H_2,off}), \quad (8)$$

где  $X_{H_2}$  и  $X_{O_2}$  – объемные доли водорода и кислорода на входе рекомбинатора,  $k_1 = 3.1 \times 10^{-10}$  кг/(с Па),  $k_2 = 3.7 \times 10^{-5}$  кг/с. С уменьшением концентрации водорода до  $X_{H_2,off} = 0.5\%$  (что ниже стартового порога) процесс рекомбинации останавливается.

В экспериментах на установке ТНАИ измеренная скорость рекомбинации водорода существенно отличалась от вычисленной по эмпирической корреляции (8) (рис. 8). На стадии накачки водорода (с 7 мин до 20 мин) объемная доля водорода на входе рекомбинатора монотонно возрастает до 6%. В соответствии с эмпирической зависимостью (4), скорость рекомбинации должна пропорционально возрастать  $\dot{r}_{H_2} \sim X_{H_2}$ , од-

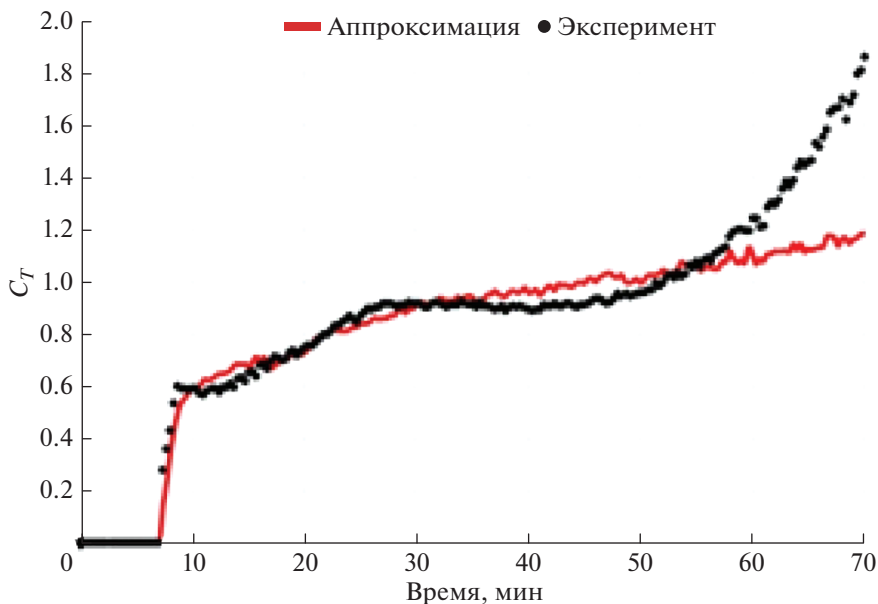


Рис. 9. Температурный коэффициент  $C_T$  в эксперименте ТНАИ НР-2.

нако в эксперименте кривая скорости рекомбинации водорода более пологая. Отклонение эмпирической корреляции от экспериментальных данных может быть связано с инерционным характером работы рекомбинатора. При изменении концентрации водорода на входе ПКРВ скорость рекомбинации не может измениться мгновенно — она ограничена скоростью диффузии водорода к поверхности каталитических пластин. Эмпирическая корреляция для производительности ПКРВ, по всей видимости, получена для стационарного режима (при постоянном расходе и концентрации водорода на входе ПКРВ).

Для применения эмпирической корреляции (8) в расчетах предлагается ввести поправочный температурный коэффициент

$$\dot{r}_{\text{H}_2}^{(\text{mod})} = C_T \dot{r}_{\text{H}_2}, \quad (9)$$

где

$$C_T = \alpha (\bar{T}_{\text{out}} - \bar{T}_{\text{in}}) / (\bar{T}_{\text{cat}} - \bar{T}_{\text{out}}). \quad (10)$$

Здесь вместо  $\bar{T}_g$  используется  $\bar{T}_{\text{out}}$ , т.к. в упрощенной модели ПКРВ каталитические пластины явно не разрешаются, и при вычислении средней температуры газа между пластинами могут возникнуть достаточно большие ошибки. Безразмерный коэффициент  $\alpha = 2$  подбирается из условия наилучшего соответствия скорости рекомбинации экспериментальным данным (рис. 8).

Модифицированная эмпирическая корреляция для скорости рекомбинации достаточно хорошо соответствует экспериментальной кривой, однако на поздней стадии ( $t > 60$  мин) при низкой концентрации водорода (<1%) скорость рекомбинации занижается. Это хорошо видно на рис. 9, где показано сравнение коэффициента  $C_T$  и величины  $C_T^{(\text{exp})} = \dot{r}_{\text{H}_2}^{(\text{exp})} / \dot{r}_{\text{H}_2}$ .

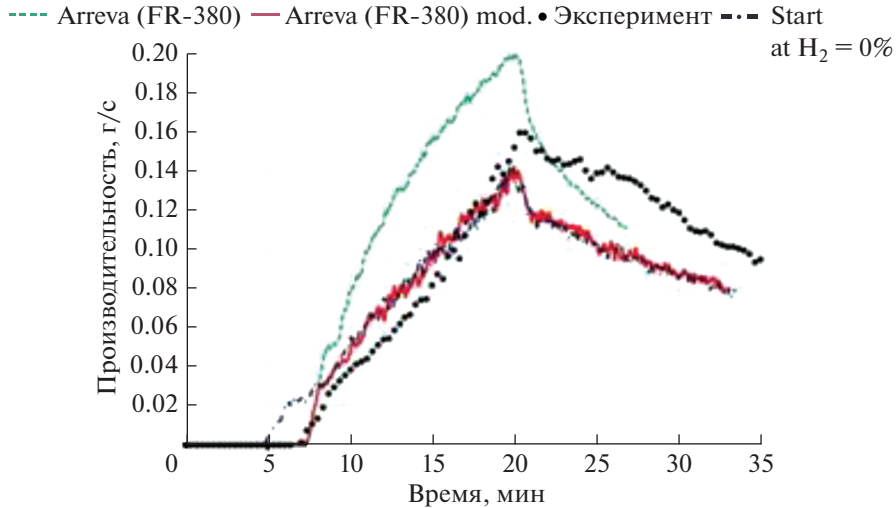


Рис. 10. Сравнение рассчитанной с использованием оригинальной и модифицированной корреляций производительности ПКРВ FR-380 с экспериментом.

Введенный температурный коэффициент  $C_T$  позволяет уточнить эмпирическую корреляцию для переходных режимов конвекции газа внутри ПКРВ. При этом, судя по рис. 9, область применения данной поправки ограничена.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ПКРВ

Старт ПКРВ в расчетах происходил на 2 минуты раньше, чем в эксперименте ТНАИ HR-2. Заметим, что в эксперименте ТНАИ HR-1, выполненном в схожих условиях, старт ПКРВ происходил на 16-й минуте при концентрации водорода 2.8 мол. %. Это можно объяснить низкой активностью катализатора. Чтобы согласовать модель с результатами эксперимента, начало рекомбинации было отложено до момента, когда концентрация водорода на входе ПКРВ достигнет 1.15 мол. %.

Расчеты были выполнены с использованием 2-х корреляций для скорости рекомбинации водорода — эмпирической корреляции для AREVA Framatome FR-380 (8) и модифицированной корреляции с температурным множителем (9)–(10), позволяющей учесть инерционность ПКРВ. Как видно из рис. 10, применение эмпирической корреляции (8) приводит к завышению скорости рекомбинации (на 10–40%) на стадии накачки водорода. В результате повышенного тепловыделения в ПКРВ происходит увеличение температурной стратификации, что способствует запираению водорода в нижней части установки. Повышенная концентрация водорода на входе ПКРВ способствует поддержанию высокой скорости рекомбинации. Из-за более быстрого сгорания водорода после прекращения инжекции скорость рекомбинации быстро падает. Применение модифицированной корреляции (9)–(10) позволило существенно приблизить результаты расчета к эксперименту, однако в пике скорость рекомбинации оказалась ниже на 12.5%. После прекращения инжекции скорость рекомбинации также оказалась заниженной.

Отклонение расчетной кривой от эксперимента связано с неправильной динамикой изменения температурного множителя  $C_T$  во времени (рис. 11). До 17 мин значе-

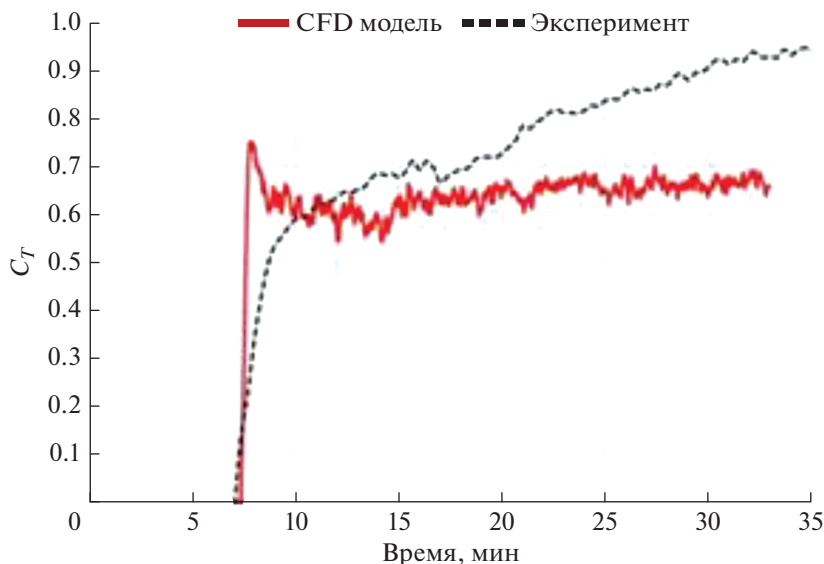


Рис. 11. Сравнение значений рассчитанного температурного коэффициента  $C_T$  с экспериментом.

ния  $C_T$  близки к эксперименту, однако далее скорость роста  $C_T$  примерно в 2.5 раза ниже, чем в эксперименте, что говорит об отклонениях по температурам каталитических пластин и газа внутри ПКРВ. Сравнение с экспериментом (рис. 12) показало, что по мере увеличения температуры скорость роста температуры катализатора и газа существенно замедляются.

Одновременное занижение температур катализатора и газа нельзя объяснить повышенным конвективным теплосъемом, связанным с ошибками в эмпирической корреляции для коэффициента теплоотдачи. Также это не объясняется увеличением теплосъема из более высокого массового расхода через ПКРВ. Значения скорости на входе ПКРВ близки к эксперименту, причем на 20-ой минуте ошибка меняет знак (рис. 13).

Источником ошибок может быть упрощенная модель переноса тепла излучением от каталитических пластин на корпус ПКРВ. Действительно, доля тепла рассеиваемая излучением быстро возрастает с ростом температуры  $q_{rad} \sim T^4$ , что приводит к снижению скорости роста катализатора, а значит и температуры газа. Неопределенность в задании внешней поверхности каталитического блока  $A_{cat}^{(out)}$  может привести к завышению лучистого теплового потока.

Помимо этого из-за наличия водяного пара среда внутри ПКРВ не является оптически прозрачной, а значит применение “wall-to-wall heat transfer model”, вообще говоря, не совсем обосновано. В данной работе детальное изучение влияния переноса тепла излучением на характеристики работы ПКРВ не проводилось.

Тепловая инерция ПКРВ приводит к возникновению гистерезиса в зависимости скорости рекомбинации от концентрации водорода на входе ПКРВ (рис. 14). В расчете с модифицированной корреляцией для производительности рекомбинатора результаты значительно ближе к экспериментальной кривой на стадии роста концентрации водорода. При уменьшении концентрации водорода петля гистерезиса выражена хуже, чем в эксперименте, из-за медленного роста коэффициента  $C_T$ .

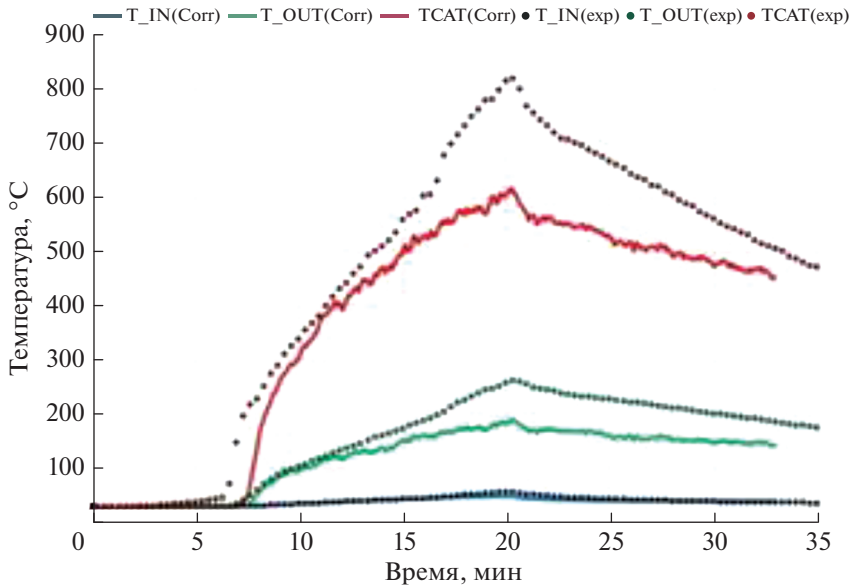


Рис. 12. Сравнение значений температуры каталитических пластин ПКРВ, температуры на входе и выходе ПКРВ с экспериментом.

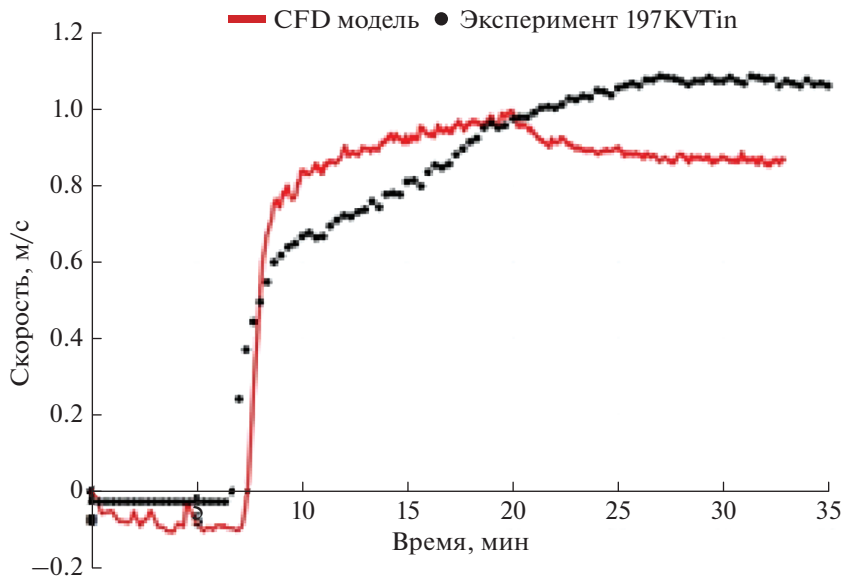


Рис. 13. Сравнение значений скорости на входе ПКРВ с экспериментом.

На рис. 15 показано распределение водорода в объеме экспериментальной установки в расчете с модифицированной корреляцией для производительности ПКРВ. В верхней половине Емкости и на уровне входа ПКРВ результаты расчета близки к экспериментальным данным. Однако в центре внутреннего цилиндра концентрация существенно занижена, а в области приемка, наоборот, завышена по сравнению с экспериментом.

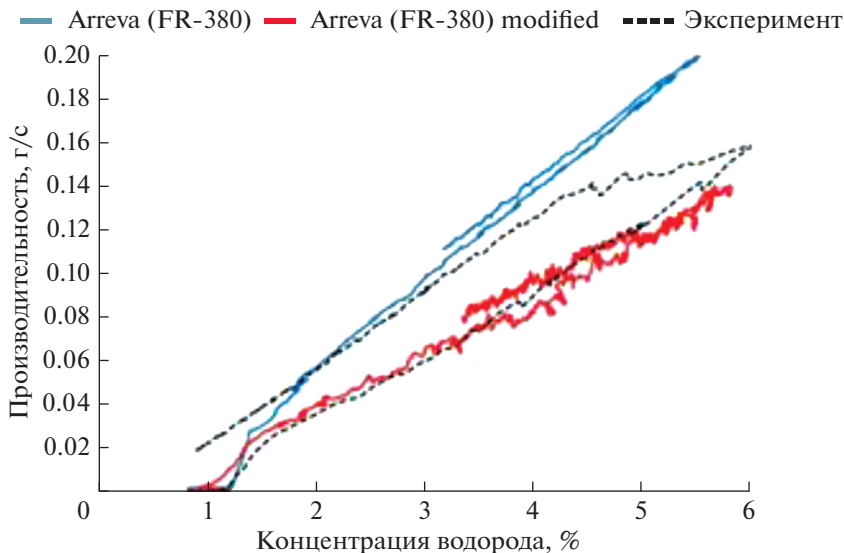


Рис. 14. Производительность ПКРВ относительно концентрации водорода на входе ПКРВ.

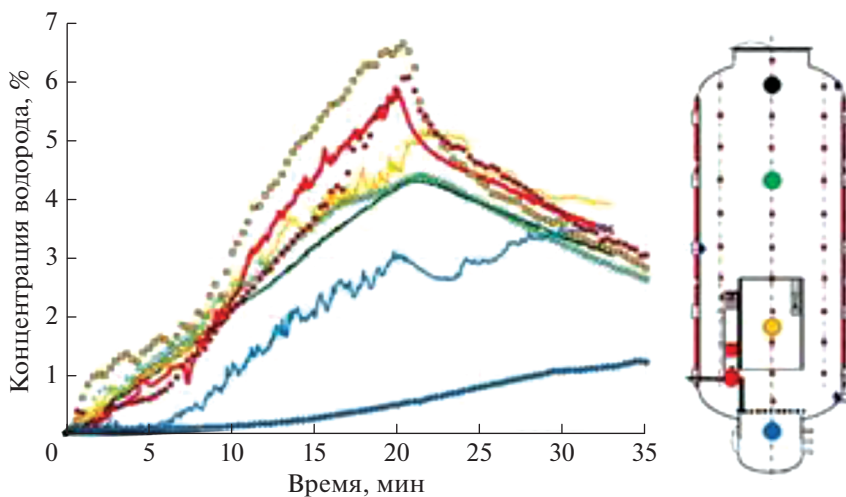


Рис. 15. Сравнение значений концентрации водорода в разных точках установки с экспериментом.

Распределение водорода напрямую связано с температурной стратификацией. В эксперименте горячий поток газа из рекомбинатора поступает в верхнюю часть установки, тогда как холодный обогащенный водородом газ из-за отрицательной плавучести аккумулируется во внутреннем цилиндре. В расчете (рис. 16) температура газа в верхней части установки существенно завышена (на 10–15°C), что приводит к опусканию границы температурной стратификации в область внутреннего цилиндра и вытеснению обогащенной водородом смеси в область приемка.

В статье [14] также наблюдалось значительное завышение температуры газа в объеме установки, причем на выходе из ПКРВ температура газа совпадала с экспериментом.

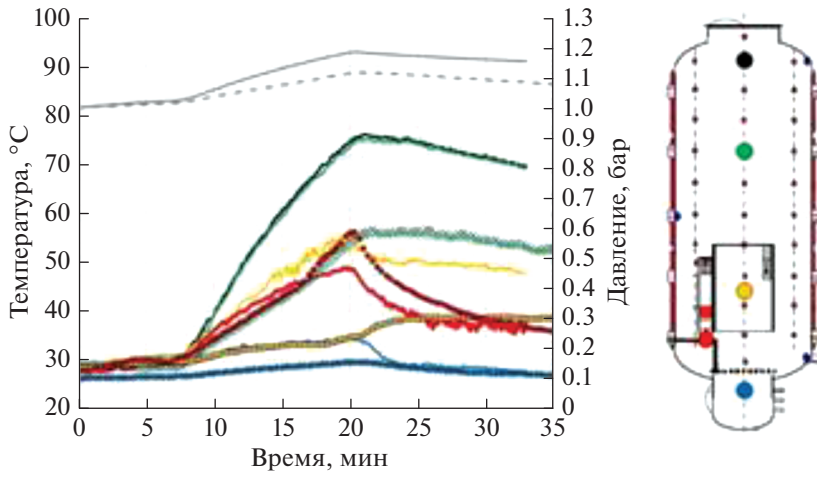


Рис. 16. Сравнение значений температуры в разных точках установки и давления с экспериментом.

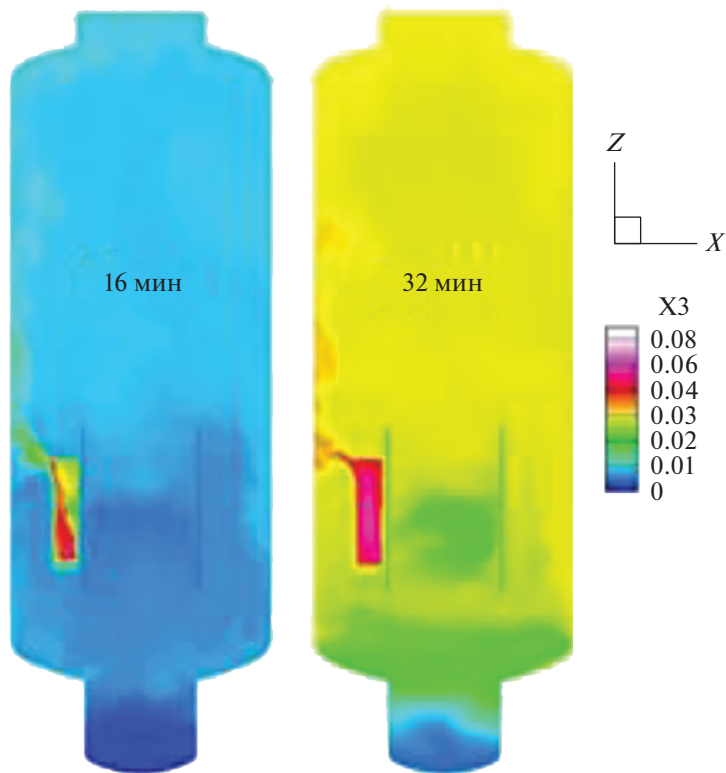


Рис. 17. Распределение водяного пара в объеме установки на моменты времени 16 и 32 мин.

Завышение средней температуры газа в объеме установки после старта ПКРВ можно объяснить недостаточно интенсивным теплообменом газа со стенками Емкости. Однако при увеличении коэффициента теплоотдачи в 2 раза наблюдалось лишь незначительное уменьшение средней температуры газа (около 1°C). По всей видимости, причина связана с влиянием переноса тепла излучением. Действительно, после старта ПКРВ средняя концентрация пара в объеме установки непрерывно повышается (рис. 17) и достигает нескольких процентов к 30 минуте. Как показали эксперименты из проекта АЯЭ ОЭСР HYMERES-2 [15], даже малое содержание пара (около 2%) в схожих условиях по давлению и температуре оказывает значительное влияние на теплообмен в экспериментальной установке. Учет переноса тепла излучением приведет к перераспределению температуры газа в объеме установки, а также к интенсификации теплообмена с внутренним цилиндром, что снизит температурную стратификацию и среднюю температуру газа в объеме установки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в данной работе математическая модель ПКРВ, основанная на подходе пористой среды и эмпирических корреляциях для производительности, позволяет моделировать некоторые аспекты работы этого устройства с помощью CFD подхода.

По результатам расчета эксперимента HYMERES HP2\_1 показана высокая точность моделирования теплового эффекта работы ПКРВ на перемешивание стратифицированной атмосферы. Данные результаты подтвердили эффективность использования такого подхода для моделирования тепловой конвекции в ПКРВ в вихреразрешающем приближении с помощью ПрЭВМ CABARET-SC1.

Для моделирования эксперимента TNAI HR-2 с ПКРВ AREVA FR-380 предложена модификация эмпирической корреляции для скорости рекомбинации, позволяющая учесть инерционный характер работы рекомбинаторов. Модифицированные корреляции для скорости рекомбинации приводят к значительному улучшению результатов по сравнению с моделированием с использованием исходных корреляций AREVA. Тем не менее в расчетах наблюдалось существенное отклонение по температуре катализатора и газа на выходе из ПКРВ, что привело к занижению скорости рекомбинации после прекращения инъекции водорода. Отклонения по температурам, вероятнее всего, связаны с упрощенным моделированием переноса тепла излучением с поверхности катализатора на корпус ПКРВ в предположении, что среда является прозрачной для тепловых лучей. Однако, наличие небольшого количества пара может повлиять на прозрачность среды и теплообмен в установке. На это также указывает завышение температуры газа в объеме установки.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [16].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. – М.: Издательство Московского университета, 2013, 472.
2. Большов Л.А., Глотов В.Ю., Головизнин В.М., Канаев А.А., Киселев А.А., Юдина Т.А. Валидация кода CABARET-SC1 на экспериментах по водородной взрывобезопасности на АЭС. Атомная энергия, 127, стр. 216–222 (2020).
3. Kanaev A. et al. “Mathematical modelling of hydrogen safety problems with CABARET scheme” Journal of Physics: Conference Series, 1392(1), 012039, (2019).
4. Glotov V. et al. “Cabaret scheme for modelling the stratification erosion in gas mixtures in hydrogen mitigation experiments for reactor safety” Journal of Physics: Conference Series, 1359, 012013, (2019).



5. *Paranjape S. et al.*, OECD/NEA HYMERES project: PANDA Test HP2\_1\_2 Quick-Look Report TM-42-17-08, Rev-0, HYMERES-P-17-39, Paul Scherrer Institute (2017).
6. *Kanzleiter T.* OECD-NEA THAI Project: Hydrogen Recombiner Tests HR-1 to HR-5, HR-27 and HR-28. Quick Look Report No. 150 1326–HR-QLR-1, Becker Technologies GmbH (2009).
7. *Kelm S. et al.*, JUELICH Post-test analysis report, ERCOSAM/WP2/P2.18/2014-12 (2014)
8. *Rozen A.* Simulation of start-up behaviour of a passive autocatalytic hydrogen recombiner, *Nukleonika -Original Edition-*, 63(2) (2018).
9. *Rozen A.* A Mechanistic Model of a Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner, *Chemical and Process Engineering*, 36 (1), pp. 3–19 (2015).
10. *Gupta S.* OECD-NEA THAI-2 Project: Onset of PAR operation in case of low oxygen concentration Quick Look Report No. 150 1420–HR33/34-QLR. Becker Technologies GmbH, (2012).
11. *Paranjape S. et al.* OECD-NEA/HYMERES-2 project: PANDA test facility description and geometrical specifications. Tech. Rep. TM-41-18-02, Rev-0, HYMERES-2-18-02 Paul Scherrer Institute (2018).
12. *Ozicik M.* Heat Transfer, A Basic Approach. 800 p., McGraw-Hill Book Company, (1985).
13. *Halouane Y., Dehbi A.* “CFD simulation of hydrogen mitigation by a passive autocatalytic recombiner”. *Nuclear Engineering and Design*, 330, pp. 488–496 (2018).
14. *Kelm S. et al.* “Passive auto-catalytic recombiner operation - validation of a CFD approach against OECD-THAI HR2-test”. Proceedings of Organisation for Economic Co-operation and Development/NEA & IAEA Workshop on Experiments and CFD Codes Application to Nuclear safety (Experiment and CFD for Nuclear Reactor Safety; XCFD4NRS), Organisation for Economic Co-operation and Development, Deajon, South Korea (2012).
15. *Kapulla R. et al.* OECD/NEA HYMERES-2 Series H2P2 Thermal Radiation effects. Results, PRG7/MB7 Meeting of the HYMERES phase 2 project, PSI, Switzerland (2021).
16. *Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В.* Практика суперкомпьютера “Ломоносов” // Открытые системы. - Москва: Издательский дом “Открытые системы”, N 7, 2012. С. 36–39.

## Numerical Eddy-Resolving Modeling of Passive Autocatalytic Recombiner Operation

A. A. Kanaev<sup>a,\*</sup>, V. Yu. Glotov<sup>a</sup>, and E. A. Kiselev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*e-mail: kanaev@ibrae.ac.ru*

The paper presents the results of numerical simulation of OECD/NEA HYMERES HP2\_1 experiment in the PANDA facility, aimed at studying the thermal effect of Passive Autocatalytic Re-combiners (PARs) operation on containment atmosphere mixing, using CABARET\_SC1 CFD code. The code is based on the eddy-resolving CABARET technique, which allows implicit modeling of the subgrid turbulence scales without using tuning parameters (Implicit LES approximation). The flow inside the PAR imitator was calculated explicitly using a simplified model of the heating section and the housing. Good agreement of calculated transient with experimental data was obtained, which indicated the effectiveness of such approach. To simulate the operation of a real PAR in complex experiments, PAR imitator model was updated with a simple model of hydrogen recombination in the PAR catalyst section based on empirical correlations. The updated PAR model was used for numerical modeling of OECD/NEA THAI experiment with real PAR (THAI HR-2).

*Keywords:* ILES, CABARET scheme, CFD for NPP safety, passive autocatalytic recombiners