

## ВАЛИДАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ РЕКОМБИНАТОРА ВОДОРОДА РВК-500

© 2024 г. **С. Г. Калякин<sup>a</sup>, А. В. Кощеев<sup>a, \*</sup>, М. К. Седов<sup>a</sup>, С. Л. Соловьев<sup>a</sup>,  
Е. В. Безгодов<sup>b</sup>, В. В. Стаханов<sup>b</sup>, В. А. Симоненко<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>АО ВНИИАЭС, Ферганская ул., д. 25, Москва, 109507 Россия

<sup>b</sup>ФГУП “РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина”,  
ул. Васильева, д. 13, а/я 245, г. Снежинск, Челябинская обл., 456770 Россия

\*e-mail: avkoscheev@vniiaes.ru

Поступила в редакцию 07.09.2023 г.

После доработки 06.10.2023 г.

Принята к публикации 01.11.2023 г.

При возникновении тяжелых аварий на АЭС с легководным теплоносителем возможен выход большого количества водорода в результате пароциркониевой реакции. В целях исключения взрывных последствий, в помещениях защитной оболочки (ЗО) устанавливаются пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ), предназначенные для его беспламенного удаления. Для обоснования водородной взрывобезопасности АЭС средствами компьютерного моделирования выполняются расчеты состояния парогазовой атмосферы внутри ЗО с учетом наличия ПКРВ. Для валидации расчетных моделей рекомбинаторов необходимы экспериментальные данные. В статье представлены результаты сравнения опытных и расчетных данных по характеристикам рекомбинатора водорода РВК-500. Дается краткое описание экспериментального стенда БМ-П, на котором впервые в России удалось исследовать работу промышленного рекомбинатора в нештатных режимах работы (режимы старта и режимы с натеканием потока). Для моделирования нештатных режимов работы рекомбинатора используется CFD-модель, описывающая течение внутри рекомбинатора в упрощенной постановке (на основе объемных источников энергии и концентрации компонентов парогазовой среды). Представлено описание CFD-модели, используемой для решения задачи моделирования работы стенда БМ-П с установленным (внутри измерительной камеры) рекомбинатором РВК-500. Для экспериментального режима с натеканием потока проведено детальное сравнение с результатами расчетов, выполненных для точек размещения датчиков (температуры и концентрации компонентов парогазовой среды). Совокупно для семи экспериментальных режимов, включая режим штатной работы рекомбинатора в условиях “покоящейся” среды, сопоставлены расчетные и экспериментальные данные по производительности рекомбинатора.

*Ключевые слова:* рекомбинатор водорода, валидация CFD-модели, водородная взрывобезопасность, моделирование аварий, эксперимент, АЭС

DOI: 10.56304/S0040363624030020

В настоящее время самыми распространенными в мире реакторами на атомных электростанциях являются легководные реакторы. При эксплуатации таких реакторов существует опасность возникновения и развития крупномасштабных аварий с осушением активной зоны и выходом большого количества водорода, образующегося в активной зоне при пароциркониевой реакции. При поступлении водорода в помещения ЗО имеется вероятность его воспламенения и интенсивного развития горения, приводящего к взрыву. Это в свою очередь повлечет за собой потерю герметичности ЗО и выброс образовавшихся радиоактивных продуктов за пределы станции. Для исключения таких последствий и обеспечения во-

дородной взрывобезопасности применяются пассивные средства противодействия, например пассивные каталитические рекомбинаторы водорода.

Принцип работы ПКРВ основан на протекании экзотермических реакций окисления водорода на катализаторе, содержащем металлы платиновой группы и расположенном в нижней части корпуса рекомбинатора, представляющего собой металлическую трубу, усиливающую процесс “поглощения” водорода при возникновении естественной конвекции (эффект дымохода). Проведение полномасштабных экспериментов в целях проверки обеспечения водородной безопасности с моделированием тяжелых аварий на АЭС и работой

ПКРВ не представляется возможным в силу высокой стоимости таких экспериментов и больших объемов ЗО (от 50 до 83 тыс. м<sup>3</sup>). На текущий момент реалистичным подходом к решению подобных задач является применение инструментов CFD-моделирования на моделях ПКРВ [1–4].

В России основной производитель рекомбинаторов для АЭС – это Инвестиционная научно-производственная компания (ИНПК) ИНПК “Русские энергетические технологии” (РЭТ), выпускающая ПКРВ с керамическими стержневыми элементами. Рекомбинатор РВК-500 является самым маленьким ПКРВ в линейке моделей, производимых ИНПК РЭТ. Каталитический блок (КБ) РВК-500 может масштабироваться для использования в более производительных ПКРВ, а относительно небольшие габариты корпуса позволяют разместить РВК-500 внутри различных экспериментальных установок. Поэтому данный тип рекомбинатора наиболее детально изучен как экспериментально, так и с помощью расчетных моделей.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального изучения режимов работы ПКРВ РВК-500 на стенде БМ-П (большой макет – прочный) и последующего моделирования этих режимов в пакете STAR-CCM+. Обычно при оценке точности численных моделей проводят предварительное моделирование (“слепые” тесты). Подобные тесты для численных моделей РВК-500 также выполнялись, но особенности методики проведения экспериментальных исследований не позволяют с требуемой точностью выдерживать параметры парогазовой смеси на входе в рекомбинатор при нестационарных режимах. Результаты предварительного моделирования можно использовать только для анализа стационарных характеристик. Для анализа практически значимых нестационарных характеристик ПКРВ приходится выполнять численное моделирование с нестационарными граничными условиями, задаваемыми на основе экспериментальных данных. В работе также представлены особенности численной постановки задачи моделирования газодинамических процессов внутри стенда БМ-П, дано краткое описание методики испытаний и численной модели рекомбинатора РВК-500.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПКРВ РВК-500

В России и мире отсутствуют общепринятые методики испытаний рекомбинаторов водорода [5]. Для разработки таких методик необходимо определить характеристики ПКРВ, принципы их измерения или критерии обнаружения, указать конструктивные особенности экспериментальных установок и постановок испытаний. Конструкция и характеристики экспериментального

стенда зависят от режимов и характеристик ПКРВ, которые планируется исследовать. Режимы работы ПКРВ существенно зависят от параметров парогазовой смеси (температуры, давления, скорости, концентрации компонентов и т.п.) на входе в рекомбинатор и особенностей доступа смеси. Поступление смеси к ПКРВ в условиях аварий на АЭС может происходить с различных направлений (рис. 1) [6]:

- низкоскоростное со всех сторон – 1 (при перемешивании смеси и диффузии водорода в парогазовой смеси);
- снизу – 2 (при нахождении ПКРВ на пути струевого или шлейфового всплытия от источника горючего вещества);
- сверху – 3 (опускной поток при охлаждении смеси или отражении струевых течений).

В первом случае на рекомбинатор не действуют принудительные потоки и он работает в штатном режиме или режиме “покоящейся” среды. Во втором и третьем случаях принудительный (или внешний) поток может усиливать скорости реакции на каталитических поверхностях или препятствовать формированию устойчивого конвективного потока. Таким образом, возможно смещение характеристик по стартовой концентрации, производительности и предела беспламенной работы ПКРВ [7].

Организовать потоки снизу или сверху можно на стенде с двумя камерами с помощью вентиляторов, установленных в соединениях (трубопроводах) между камерами. Для режима “покоящейся” среды необходимо использовать устройство для распределения потока (УРП), которое способствует замедлению потока из трубопровода. Во ВНИИТФ разработаны методики испытаний, учитывающие все перечисленные особенности работы ПКРВ [8].

Корпус рекомбинатора РВК-500 выполнен из нержавеющей стали и имеет размеры 320 × 220 × 850 мм (рис. 2, а). Масса рекомбинатора составляет около 20 кг, из которых примерно 7 кг приходится на каталитический блок. В нижнем торце корпуса сделано окно, по три окна выполнено также на боковых сторонах в верхней части. На окнах установлена мелкая ячейчатая сетка. Внутри корпуса в нижней его части расположены один над другим два каталитических блока общей высотой 200 мм. Каждый блок представляет собой ящик (рис. 2, б), в котором размещены рамки с цилиндрическими каталитическими стержнями (каталитическими элементами), имеющими осевые отверстия для установки в держателе рамки. Подложка стержней изготовлена из  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, на сами стержни нанесено платиновое покрытие. Общее количество стержней в РВК-500 составляет 696 шт. В состоянии поставки стержни имеют

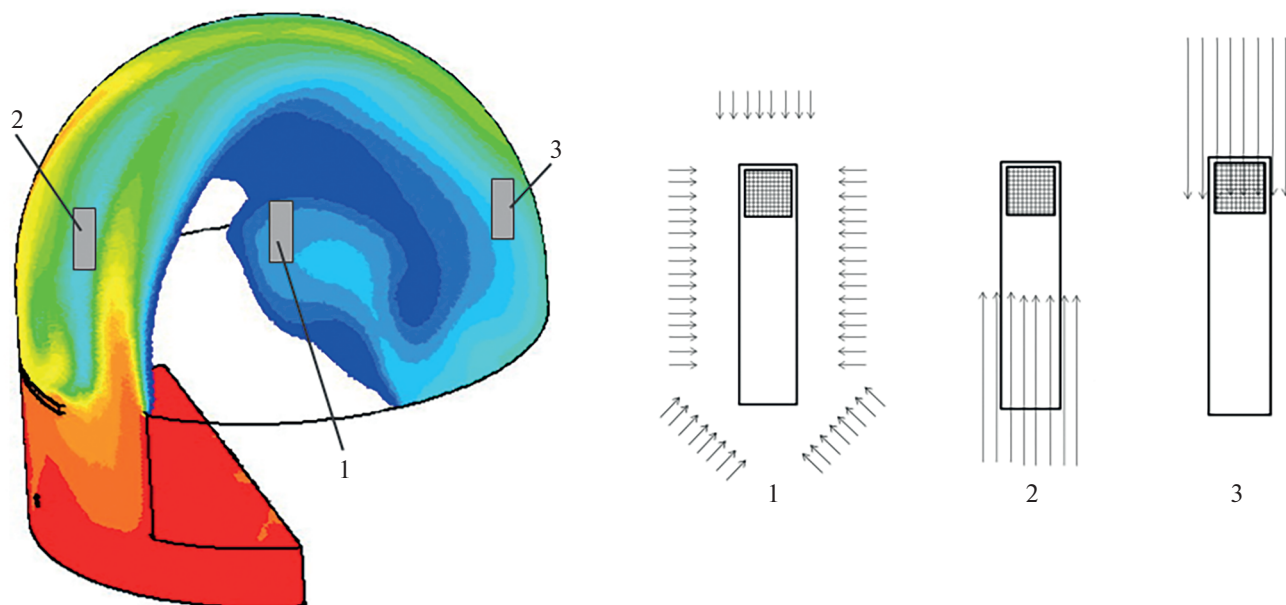
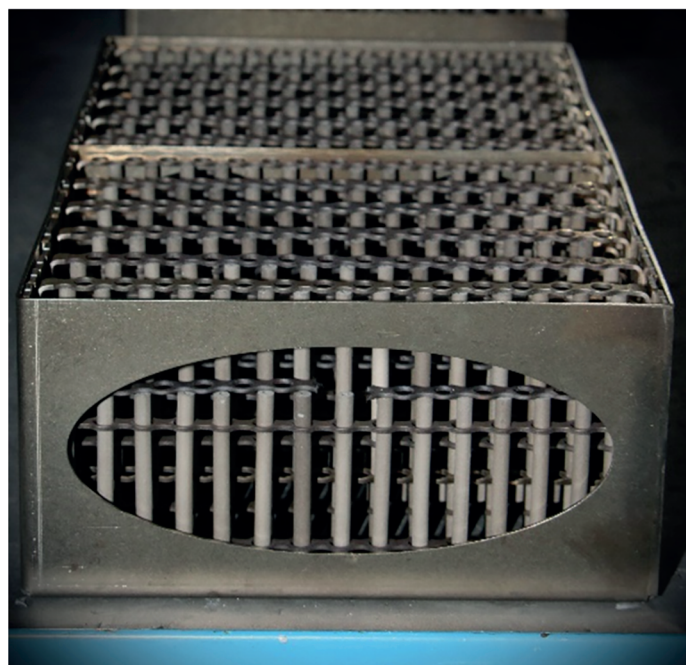


Рис. 1. Взаимодействие ПКРВ с потоками смеси под защитной оболочкой [6]

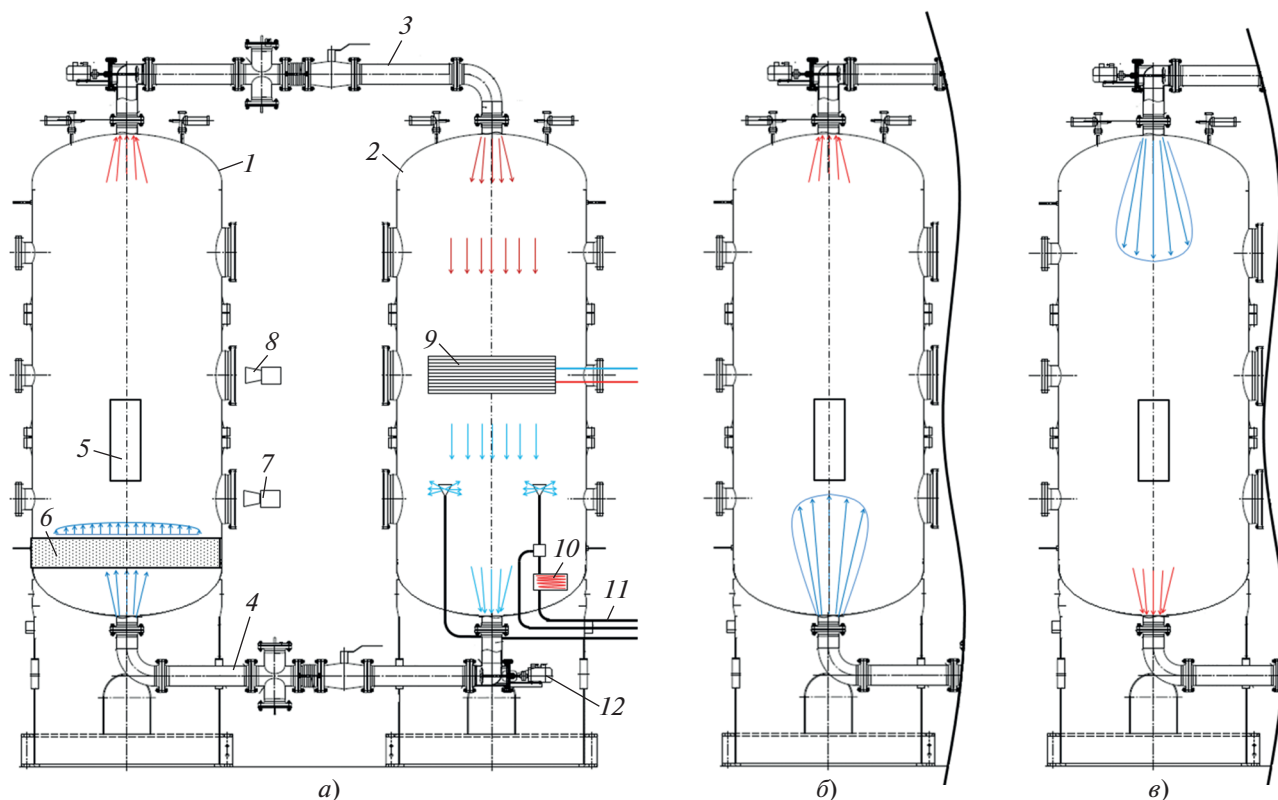


а)



б)

Рис. 2. Пассивный каталитический рекомбинатор водорода РВК-500.  
а – вид снизу; б – каталитический блок со стержнями



**Рис. 3.** Схема установки БМ-П и постановка испытаний ПКРВ.

*a* – режим “покоящейся” среды; *б* – потоки снизу; *в* – потоки сверху;

1 – БМ-П1; 2 – БМ-П2; 3 – верхний трубопровод; 4 – нижний трубопровод; 5 – ПКРВ; 6 – УРП; 7 – PIV; 8 – шпирен-съемка; 9 – теплообменник; 10 – нагреватель газов; 11 – трубопроводы подачи газов; 12 – вентилятор

гидрофобное покрытие (тефлон). Масса каждого стержня около 2.5 г.

Испытания проводились на площадке ВНИИТФ на экспериментальном стенде БМ-П, состоящем из двух камер (рис. 3). Стенд рассчитан на статические давления до 0.5 МПа и средние температуры до 200°C, полезный объем составляет 30 м<sup>3</sup>. Каждая камера представляет собой цилиндр высотой внутри 5 м и диаметром 2 м с эллиптически-ми крышками.

Камера, в которой размещается рекомбинатор, обозначается как камера БМ-П1 (рекомбинатор устанавливается на оси камеры), соседняя – БМ-П2. В камере БМ-П2 расположены трубы для подачи газов (водорода, водяного пара, кислорода, азота, монооксида углерода), нагреватель газов, теплообменник. Во время испытаний теплоноситель в теплообменнике находится в статичном положении (т.е. не перекачивается) при начальной температуре испытания.

Камеры соединены нижним и верхним трубопроводами, оснащенными конденсатороборудованиями (крестовинами). Диаметр трубопроводов составляет 0.2 м. В нижнем трубопроводе находится вентилятор, запускающий принудительный пе-

реток газа по камерам, причем благодаря вращению вентилятора в обе стороны обеспечиваются различные режимы циркуляции (см. рис. 3). Вентилятор приводится в движение электродвигателем с частотой вращения до 2700 мин<sup>-1</sup>, которая при необходимости может изменяться. Для испытаний с низкоскоростным подводом смеси (режим “покоящаяся” среда) под ПКРВ устанавливается устройство для распределения потока. С помощью УРП поток смеси от вентилятора из нижнего трубопровода замедляется и распределяется на все сечение камеры (см. рис. 3, *a*). Итоговая скорость потока смеси в зоне ПКРВ составляет 0.02–0.05 м/с [измерения проведены с помощью цифровой трассерной анемометрии PIV (particle image velocimetry)].

Для поступления смеси в ПКРВ снизу устройство для распределения потока демонтируют, и поток от вентилятора напрямую воздействует на рекомбинатор (см. рис. 3, *б*). В испытаниях с потоком сверху обратное вращение вентилятора формирует опускающий поток (см. рис. 3, *в*). Подача газов осуществляется через две вертикально ориентированные стальные трубы диаметром 12 мм. На выходах труб установлены конфорки для га-

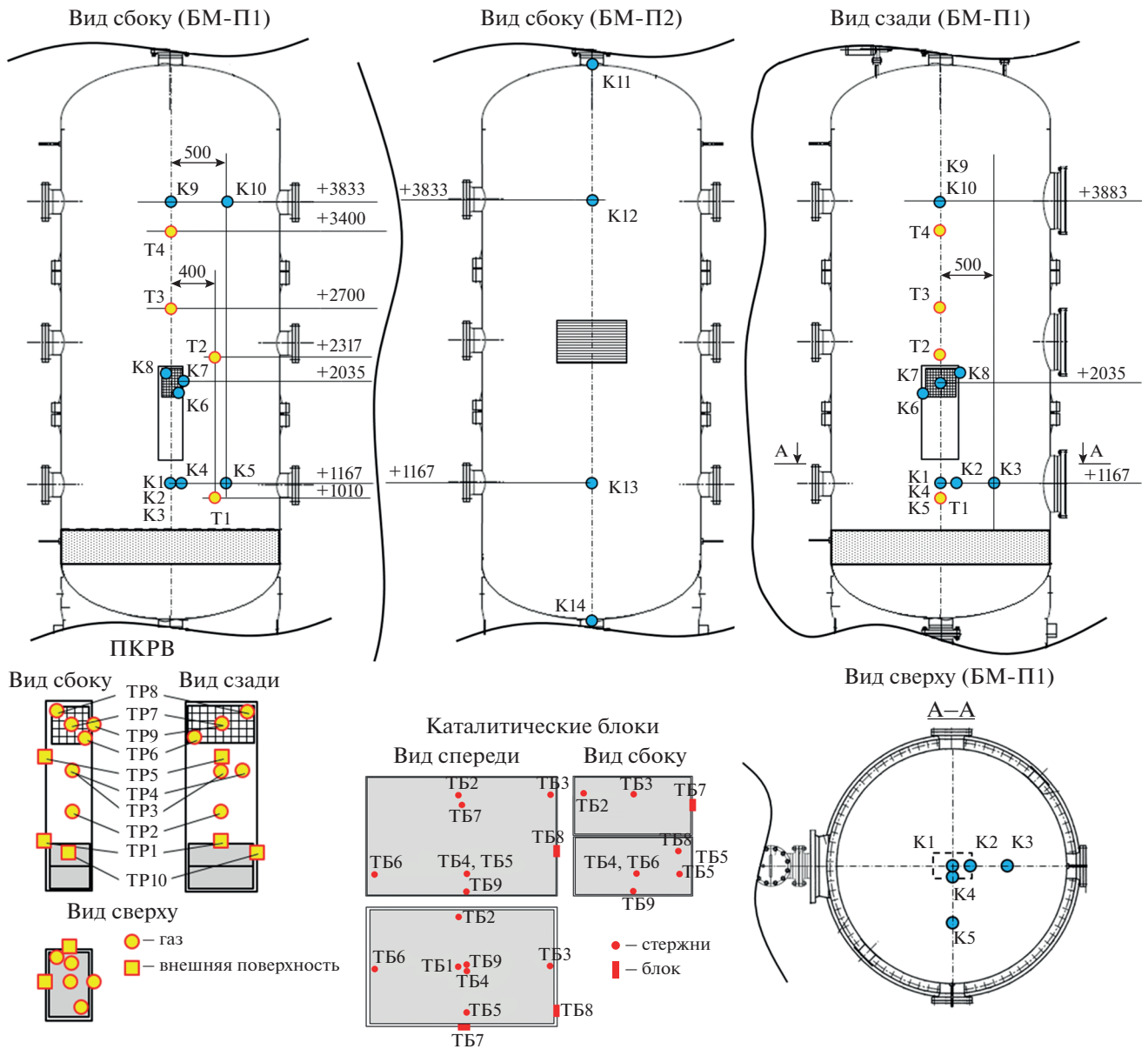


Рис. 4. Расположение средств измерений в установке БМ-П

шения импульса струй и более эффективного перемешивания поступающих газов с атмосферой БМ-П2. Во избежание излишней конденсации в трубе при смешении водорода с водяным паром, водород подогревается в нагревателе газов до начальной температуры смеси, требуемой при проведении испытаний.

Статическое давление в камере измерялось манометром АИР-30М с абсолютной погрешностью не более  $\pm 0.5$  кПа. На рис. 4 представлены схемы измерения в ПКРВ состава газов и температуры.

Измерения температуры внутренних, внешних стен камер (на рис. 4 не показаны), газовой

смеси в камерах (Т1–Т4), температуры корпуса ПКРВ и газа внутри корпуса (ТР1–ТР10), катализатора (ТБ1–ТБ6) и конструктивных частей блока (ТБ7–ТБ9) проводились хромель-копелевыми (L) и хромель-алюмелевыми (K) термопарами с абсолютной погрешностью от  $\pm 0.7^\circ\text{C}$  (при температурах до  $100^\circ\text{C}$ ) до  $\pm 4.7^\circ\text{C}$  (при температурах около  $900^\circ\text{C}$ ). Для измерения температуры в катализаторе датчики размещали по сечению каталитического блока (центральная, боковые, угловая и промежуточные точки) и в нескольких точках по высоте на оси каталитического блока для определения температурных полей. Термопары монтировали в осевых каналах каталитических стержней.

Определение состава газов осуществлялось системой непрерывного контроля в девяти точках объема камеры (К1, К3, К5, К7, К9, К10, К11, К13, К14) в режиме реального времени с частотой 0.33 Гц. Относительная погрешность измерения объемной доли кислорода  $C_{O_2}^0$  в осушенной смеси не превышала  $\pm 10\%$ . Абсолютная погрешность измерения объемной доли водорода в осушенной пробе  $C_{H_2}^0$  до 2.0% (по объему) не превосходила  $\pm 0.3\%$  (по объему), для объемной доли  $C_{H_2}^0$  свыше 2.0 (по объему) составила  $\pm(0.04C_{H_2}^0 + 0.27)\%$  (по объему).

В определенные моменты времени из точек К1–К14 выполнялся газоотбор по трубкам в вакуумированные баллоны (до пяти отборов за эксперимент). После эксперимента баллоны охлаждались до комнатной температуры. Состав газа далее анализировался на хроматографе “Цвет-800”, относительная погрешность измерений объемной доли водорода, кислорода и азота не превышала  $\pm 3.2$ ,  $\pm 3.4$  и  $\pm 2.1\%$  соответственно. Газоотбор применялся для калибровки системы непрерывного отбора и повышения точности определения характеристик реактора.

Точки К1–К5 были необходимы для контроля однородности состава газовой смеси в сечении под входом в ПКРВ. При этом данные, полученные в точке К1, применялись как параметры смеси на входе в ПКРВ. Для изучения влияния излучения от ПКРВ использовались данные с ближайших точек (К3 или К5). В качестве выходной объемной доли водорода принимались значения в точке К7. Оставшиеся точки (К9, К10, К12, К13) требовались для контроля состава газовой смеси в камерах, в том числе для последующего сравнения с результатами расчетов.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РВК-500 НА СТЕНДЕ БМ-П

Наибольшая практическая значимость разработки численных моделей ПКРВ состоит в решении задачи моделирования аварийных процессов внутри защитной оболочки [3, 4]. Даже без учета влияния реакторов данная задача требует больших вычислительных ресурсов из-за сложных геометрических характеристик расчетной области (помещения, оборудование) и многообразия физических процессов, протекающих при тяжелой аварии. Суммарное количество ПКРВ, размещенных в ЗО, может превышать 200 ед., поэтому детальное моделирование физико-химических процессов внутри каждого реактора делает задачу моделирования почти нерешаемой. На практике для подобных задач используют мо-

дели реакторов типа “черный ящик”. Для таких моделей ПКРВ задаются только внешние граничные условия (вход, выход и стенки корпуса), а процессы внутри реактора описываются упрощенными полуэмпирическими моделями [1, 3]. Как правило, такие модели настраивают на штатные режимы работы (“покоящаяся” среда, квазистационарный процесс).

Известно, что при развитии тяжелой аварии часть реакторов может работать в условиях натекания (частичного натекания) потока, и в течение небольшого промежутка времени скорость поступления водорода на вход в ПКРВ может существенно изменяться. Изучение подобных процессов при проведении экспериментальных работ (например, на стенде БМ-П) имеет несколько ограничений, связанных с формированием внешних потоков и степенью пространственной детализации параметров парогазовой смеси внутри и вокруг реактора.

В качестве дополнения к немногочисленным данным экспериментальных работ и для улучшения понимания работы ПКРВ в нештатных условиях была разработана модель реактора РВК-500 для моделирования режимов натекания [2]. В используемой CFD-модели рассматривается течение внутри реактора, но без детального разрешения элементов конструкции на сеточном уровне. Применяется подход на основе различных объемных и поверхностных источников для уравнений моментов, энергии и переноса компонентов парогазовой смеси. Для определения характерных температур твердотельных элементов конструкции ПКРВ (корпус, элементы каталитического блока) используется отдельная модель, разработанная на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений, получаемых из интегральной формы закона сохранения энергии для различных контрольных объемов (элементов конструкции) [1, 2].

В этом приближении для корпуса реактора, каталитических элементов и каркаса КБ для каждого момента времени вычисляются осредненные (по соответствующим элементам конструкции) значения температуры, которые используются для задания граничных условий и объемных источников энерговыделения в CFD-модели. Для задания объемных источников/стоков компонентов парогазовой смеси (вследствие каталитических химических реакций внутри КБ) применяется зависимость для производительности ПКРВ РВК-500, полученная с учетом влияния скорости потока через КБ с помощью параметрических CFD-расчетов элементарного сегмента каталитического блока. Для учета гидравлических потерь на стенках корпуса и защитных сетках используют полуэмпирические зависимости, а для гидравлических потерь внутри КБ рассчи-

тывают расходную характеристику КБ с поправками на неоднородность входного потока. Детальное описание CFD-модели ПКРВ РВК-500 представлено в [2].

Схема проведения испытаний рекомбинатора РВК-500 на стенде БМ-П показана на рис. 3. Необходимо отметить, что на этой схеме присутствуют два активных устройства, которые изменяют температуру потока внутри экспериментальной установки: ПКРВ, расположенный в камере БМ-П1, и теплообменник, размещенный в камере БМ-П2. Теоретически мощности данных устройств должны быть одинаковыми – теплообменник должен поглощать тепло, выделяемое рекомбинатором, и обеспечивать постоянную температуру на входе в камеру БМ-П1. На практике, в ходе эксперимента, температура (и давление) в камере БМ-П1 заметно повышалась, особенно на последних стадиях, когда объемная доля водорода на входе в ПКРВ приближалась к значениям, достаточным для возникновения объемного внутреннего горения в рекомбинаторе.

Влияние давления и температуры на характеристики ПКРВ довольно существенное, поэтому расхождения в определении значений этих величин на входе в рекомбинатор приводят к несовпадению других параметров парогазовой смеси внутри стенда. Для корректного моделирования процессов внутри стенда БМ-П наряду с CFD-моделью ПКРВ необходимо было создать CFD-модель и теплообменника. Точность обеих моделей должна быть очень высокой, поскольку для решения нестационарной задачи результирующая ошибка в определении температуры может накапливаться из-за непрерывной циркуляции парогазовой смеси между двумя камерами. В результате ошибка в определении температуры на выходе из ПКРВ будет приводить к ошибке в расчете теплоотдачи теплообменника, а ошибка в определении температуры после теплообменника – к ошибке в расчете параметров смеси на выходе из ПКРВ.

Дополнительную сложность при моделировании температуры потока создают процессы конденсации/испарения дисперсной фракции воды, которая согласно измерениям PIV присутствует в потоке. В рассмотренной CFD-модели процессы испарения/конденсации не моделируются.

Поскольку основной задачей данной работы является изучение характеристик ПКРВ, для повышения точности моделирования расчетная область задачи включает в себя только камеру БМ-П1. При такой постановке отпадает необходимость моделирования теплообменника и исключается возможность накопления ошибки вычисления температуры потока из-за циркуляции парогазовой смеси внутри стенда. Благодаря этому существенно уменьшаются размерность

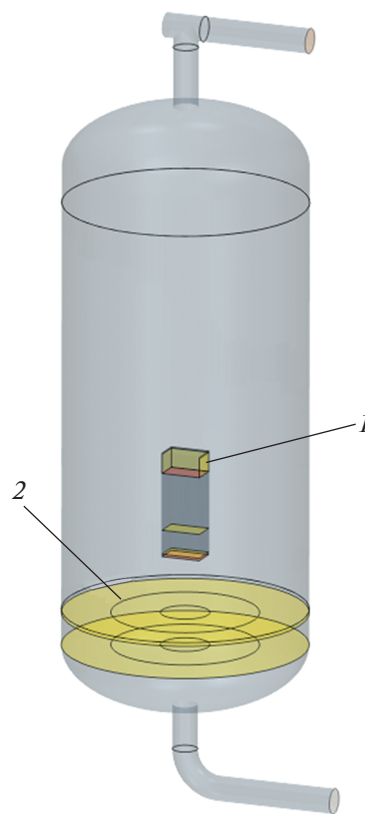


Рис. 5. Расчетная область для CFD-модели.  
1 – ПКРВ РВК-500; 2 – устройство гомогенизации

расчетной сетки и требуемые вычислительные ресурсы.

Общий вид расчетной области CFD-модели представлен на рис. 5. На рисунке показаны ПКРВ и интерфейсные поверхности, соответствующие УРП. Для моделирования гидравлических потерь на элементах УРП задавались коэффициенты живого сечения, вязкостный и инерционный коэффициенты пористости соответствующих элементов. При моделировании режимов натекания элементы УРП не использовались (поток свободно проходит через эти поверхности).

Полный расход потока задавался на основе значения среднерасходной скорости в подводящем патрубке – около 2.8 м/с. Необходимо отметить, что экспериментальные измерения скорости потока проводились только в области входа в ПКРВ методом PIV. Скорость потока в патрубке оценивалась на основе результатов расчетов. На входной границе нижнего подводящего патрубка задавались нестационарные экспериментальные данные по температуре и объемным долям компонентов парогазовой смеси. Для этого анализировались показания датчиков системы непрерывного контроля К1, К3, К5 и К14. Если разброс показаний был небольшим, то бралось среднее значение

**Таблица 1.** Испытания рекомбинатора водорода в условиях “покоящейся” среды в штатных режимах работы

Режим	Температура, °С	Давление, кПа	Концентрация водяного пара, % (по объему)
P2	65	143	16
P3п	82	171	27
P4–P6	102	242	46
P7	108	262	56

по всем датчикам. Если показания какого-либо датчика существенно отличались (или отсутствовали), то вклад в значение параметра граничных условий от данного датчика не учитывался.

На выходной границе отводящего патрубка задавались нестационарные экспериментальные данные по давлению в камере БМ-П1. На стенках камеры и патрубков устанавливалось значение температуры, соответствующее началу проведения эксперимента. Предполагалось, что теплоемкость стенда велика и за время проведения эксперимента температура конструкции не успевает заметно измениться.

Каталитический блок ПКРВ моделировался пористой средой с дополнительными объемными источниками энергии и концентрации (объемной доли) компонентов парогазовой среды. На интерфейсной поверхности входа в ПКРВ определялись осредненные параметры смеси (температура, скорость, концентрации компонентов), используемые для расчета значений объемных источников каталитического блока. На внешней поверхности корпуса ПКРВ для каждого момента времени устанавливалось расчетное значение средней температуры корпуса. На внутренней поверхности корпуса задавались адиабатические условия (адиабатическая стенка), а учет теплообмена проводился путем введения дополнительно эмпирического объемного источника энергии внутри каминной части рекомбинатора.

Для точного моделирования теплообмена на стенке необходимо детальное разрешение пограничного слоя, введение объемного источника позволяет существенно уменьшить размерность расчетной сетки. Следует отметить, что используемая эмпирическая зависимость для данного объемного источника справедлива, строго говоря, для установившихся режимов работы ПКРВ. В процессе старта рекомбинатора скорости потока внутри каминной части очень малы и режим течения – ламинарный. После выхода на установившийся режим течение в каминной части становится турбулентным. Поскольку при ламинарном режиме теплоотдача на стенке значительно меньше, чем при турбулентном, то в рассматриваемой CFD-модели ПКРВ учет дополнительного охлаждения потока в каминной части осуществляется только для турбулентного течения на установив-

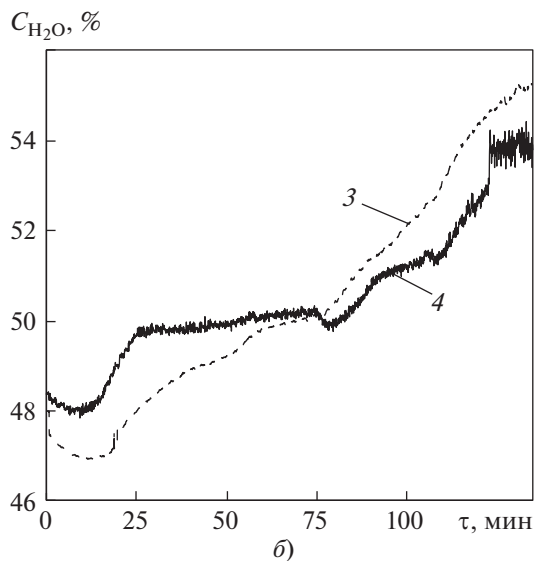
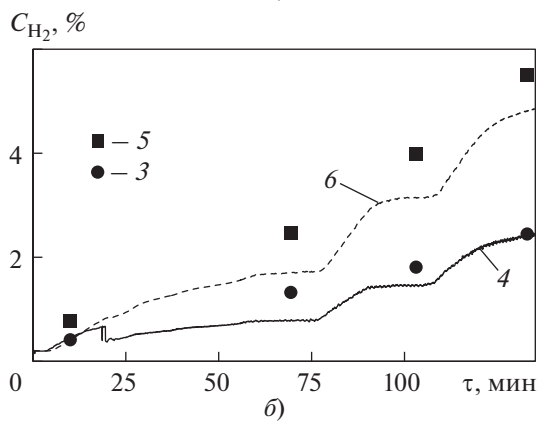
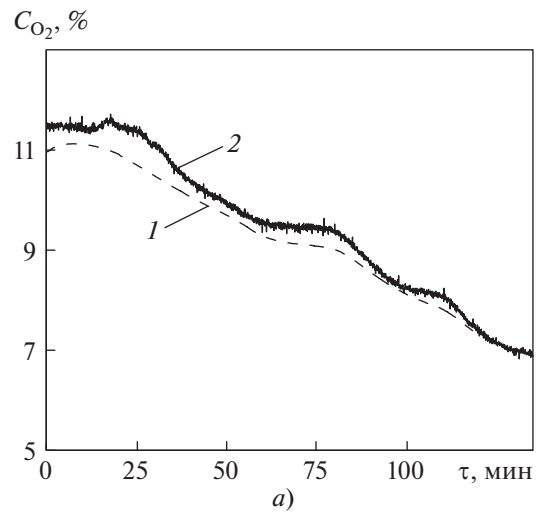
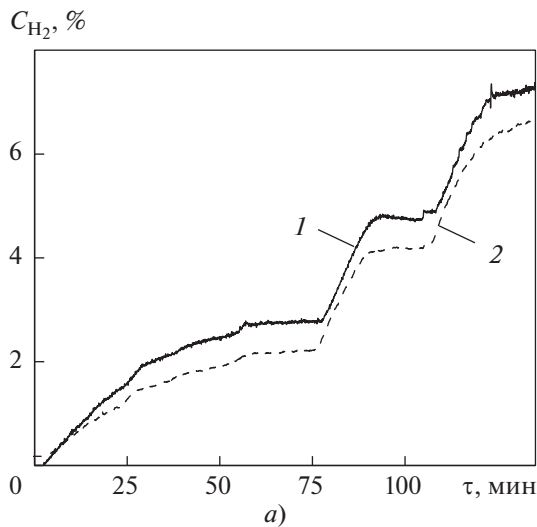
шихся режимах работы. Для переключения между ламинарным и турбулентным режимами при расчетах в каминной части применяется эмпирический критерий старта ПКРВ РВК-500, согласно которому газодинамический старт происходит при концентрации водорода на входе 1% (по объему). В результате в момент переключения (при соблюдении критерия газодинамического старта) расчетные значения температуры парогазовой смеси в каминной части резко уменьшаются на 20–30°С. Исключить данный эффект можно путем учета влияния ламинарно-турбулентного перехода на теплоотдачу на поверхности, но это приведет к существенному усложнению CFD-модели рекомбинатора.

Были проведены расчеты штатной работы рекомбинатора в условиях “покоящейся” среды по данным испытаний P2, P3п, P7 и серии повторных испытаний P4–P6, отличающихся начальными условиями (см. таблицу). Далее подробно рассмотрено испытание P19п с нештатным режимом работы рекомбинатора. Это единственный режим экспериментальной программы ВНИИТФ, который соответствует натеканию широкой струи снизу на рекомбинатор. Цель испытания – определение стартовых характеристик, производительности и предела беспламенной работы ПКРВ РВК-500 при параметрах смеси 100°С, 229 кПа, 44% (по объему) водяного пара и скорости внешнего потока 1 м/с при соотношении объемных долей кислорода и азота 0.27 (“воздушное” соотношение). Важно отметить, что скорость внешнего потока существенно менялась вдоль оси натекающей струи.

Скорость потока в условиях испытания P19п определялась непосредственно в эксперименте с помощью PIV, дополнительной проверки с помощью термоанемометра не проводилось. Измерения выполнялись в области перед входом в ПКРВ на расстоянии 50–100 мм от плоскости входа. Скорость потока варьировалась в диапазоне от 0.1 до 1.0 м/с. Поток являлся неустойчивым по направлению – ядро потока меняло свое местоположение относительно ПКРВ.

Общая продолжительность эксперимента составила 160 мин. Последняя фаза испытаний (со 135-й по 160-ю минуту) включала повышение входной концентрации водорода до уровня, при котором происходят объемное горение внутри





**Рис. 6.** Расчетные и экспериментальные данные по объемной доле водорода, полученные в испытании Р19п (обозначение точек измерения см. рис. 4). *а* – точка К1: 1 – эксперимент, 2 – расчет; *б* – точка К7: 3 – эксперимент, 4 – расчет; *в* – точка К9: 5 – эксперимент, 6 – расчет

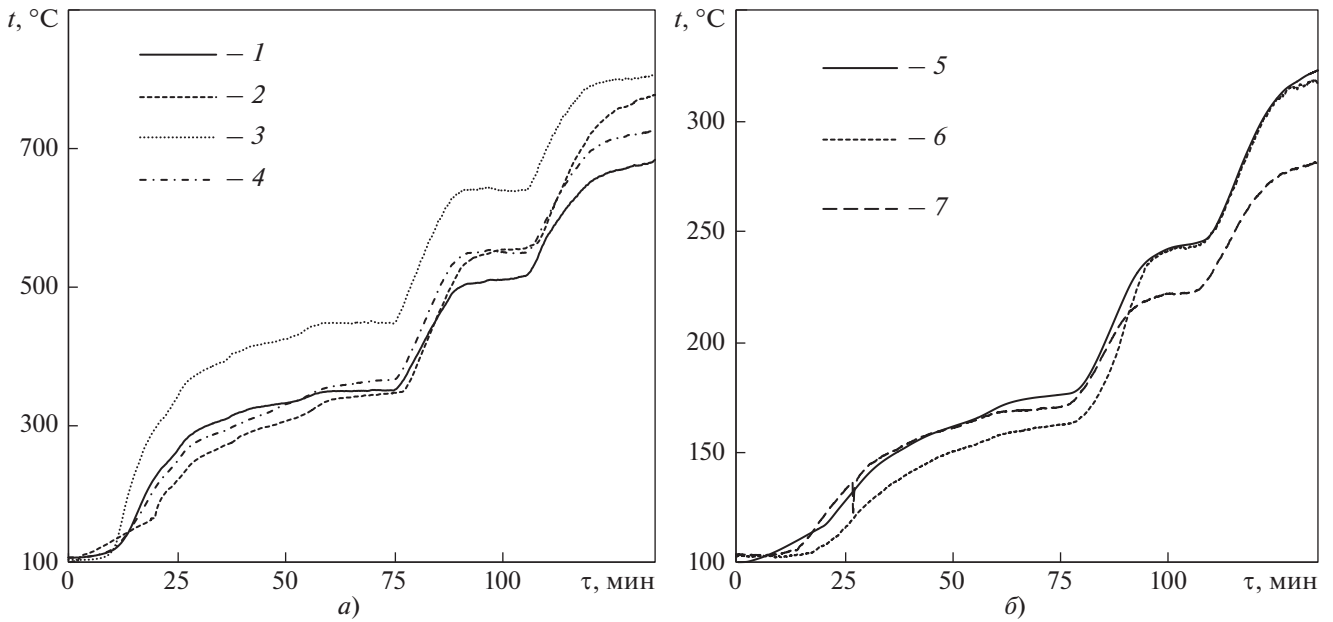
**Рис. 7.** Расчетные и экспериментальные данные объемной доли кислорода и водяного пара, полученные в испытании Р19п (обозначение точек см. рис. 4). *а* – точка К9: 1 – расчет, 2 – эксперимент; *б* – точка К7: 3 – расчет, 4 – эксперимент

ПКРВ и дальнейший выход пламени из ПКРВ. Поскольку данный эффект не воспроизводится расчетной моделью, численное моделирование выполнялось до 135-й минуты от начала эксперимента. На рис. 6 и 7 представлены экспериментальные и расчетные данные по концентрациям компонентов парогазовой смеси ( $H_2$ ,  $H_2O$  и  $O_2$ ) в различных точках объема камеры (см. рис. 4).

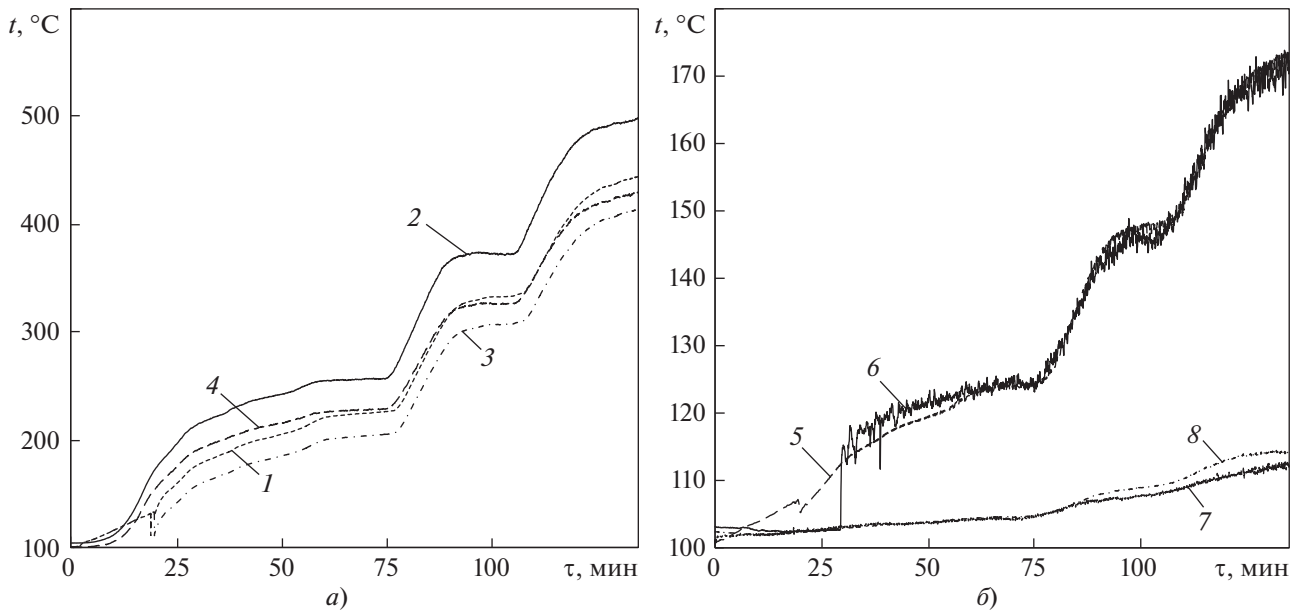
На этих рисунках наблюдается хорошее [разница менее 1% (по объему)] совпадение экспериментальных и расчетных данных по концентрациям водорода и кислорода. Расчет концентрации водяного пара менее точен, поскольку модель не учитывает процессы конденсации/испарения. Следует отметить, что совпадение экспериментальных и расчетных данных по концентрациям компонентов смеси для режима натекания оказывается хуже, чем для штатных режимов. Это связано с образованием в объеме камеры обширных нестационарных

зон возвратного течения, которые существенно усложняют картину распределения параметров парогазовой смеси.

На рис. 8 показаны расчетные и экспериментальные данные по температуре элементов конструкции ПКРВ, полученные в испытании Р19п, а на рис. 9 – экспериментальные и расчетные данные по температуре парогазовой смеси в том же испытании. На рис. 8 видно, что характерная температура  $t_c$  оказывается на уровне экспериментальных измеренных значений температуры каталитических элементов (КЭ) верхнего ряда (более холодных) и ниже, чем среднее значение температуры КЭ (по установленным датчикам). Характерная температура стенок корпуса  $t_w$  примерно совпадает с осредненной температурой,



**Рис. 8.** Расчетные и экспериментальные данные по температуре элементов конструкции ПКРВ, полученные в испытании Р19п (обозначение термопар см. рис. 4).  
*а:* 1 – эксперимент (ТБ3); 2 – расчет ( $t_e$ ); 3 – эксперимент (ТБ6); 4 – эксперимент (ТБ1); *б:* 5 – расчет ( $t_w$ ); 6 – эксперимент (ТР1); 7 – эксперимент (ТР10)

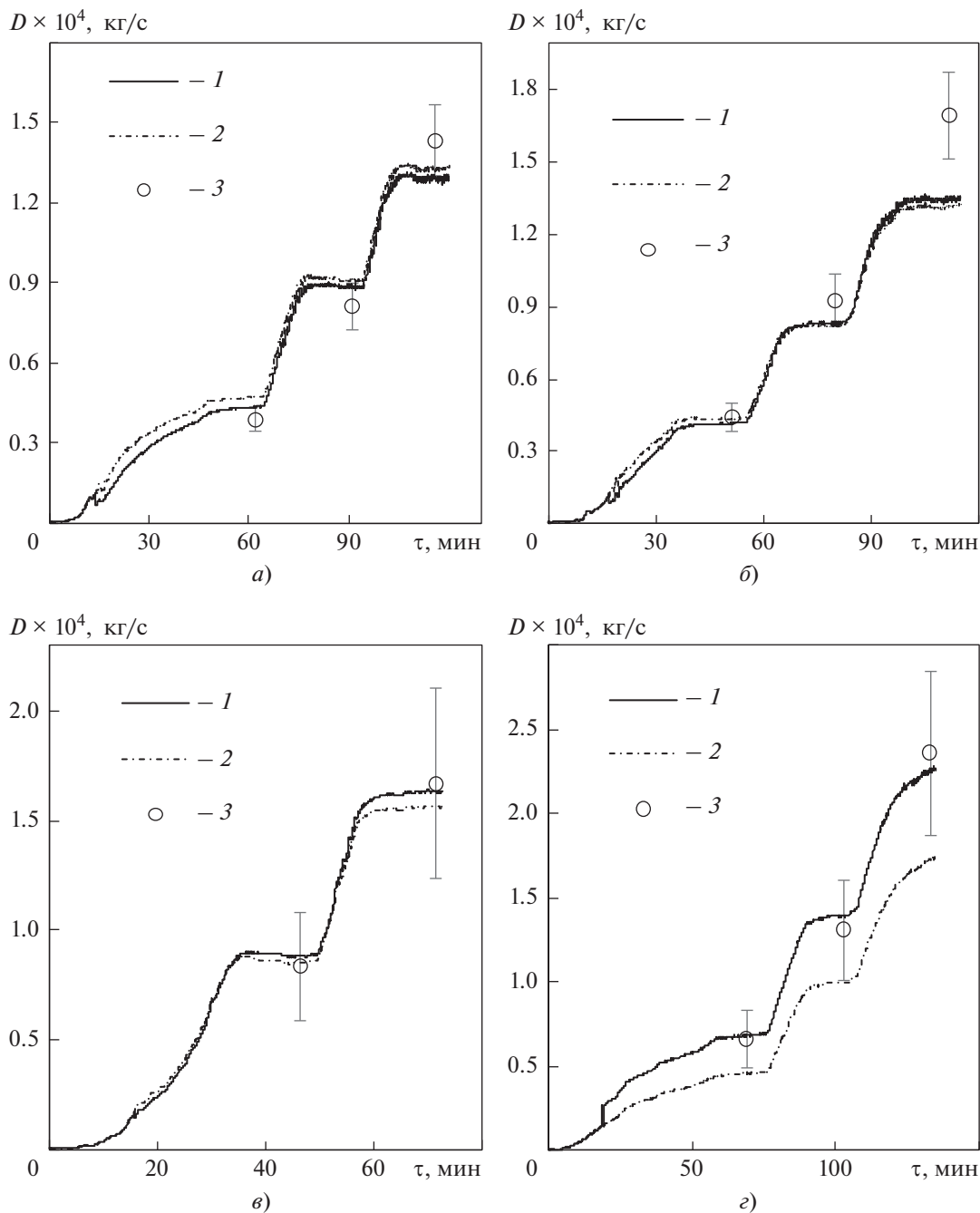


**Рис. 9.** Расчетные и экспериментальные данные по температуре парогазовой смеси, полученные в испытании Р19п (обозначение точек см. рис. 4).  
*а* – точка ТР2: 1 – расчет; 2 – эксперимент; точка ТР7: 3 – расчет; 4 – эксперимент; *б* – точка Т4: 5 – расчет; 6 – эксперимент; точка К1: 7 – расчет; 8 – эксперимент

измеренной датчиками на корпусе. Значение  $t_w$  используется в качестве граничного условия для внешних стенок ПКРВ РВК-500.

На рис. 9 видно, что для датчиков, расположенных над КБ (ТР2), наблюдается превышение

экспериментальных данных над результатами моделирования. Поскольку это превышение с ростом температуры увеличивается, наиболее вероятным объяснением является дополнительный инфракрасный (ИК) нагрев датчиков температуры (датчики не экранированы от ИК-излучения).

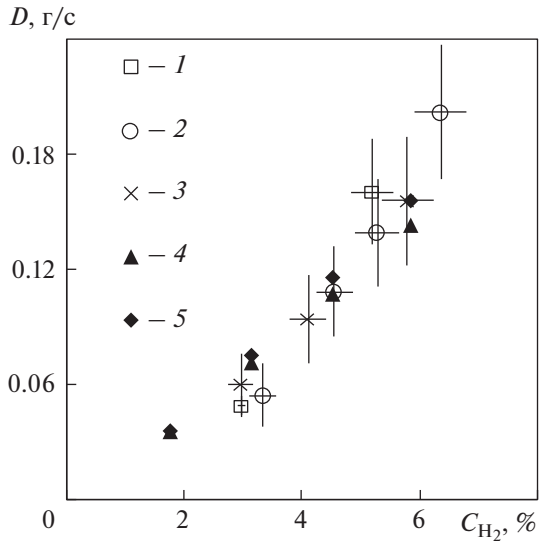


**Рис. 10.** Производительность ПКРВ РВК-500 при различных режимах.  
 Режим: а – Р2; б – Р3п; в – Р7; з – Р19п; 1 – расчет  $D_{new}$ , 2 – расчет  $D_{old}$ , 3 – эксперимент

Для датчиков, измеряющих температуру на выходе из ПКРВ (ТР7), расхождение составляет менее 25°C, а для датчиков, расположенных в объеме камеры БМ-П1, расхождение между данными расчета и эксперимента составляет не более 5°C для нижней части камеры и не более 10°C для ее верхней части.

При моделировании работы ПКРВ РВК-500 на установке БМ-П1 использовалась методика расчета

производительности с учетом скорости потока через каталитический блок:  $D_{new} = D(t, C_{H_2}, \bar{U})$ . Эта методика была построена для характерных скоростей потока через КБ, а именно выше 0.2 м/с. В режиме старта ПКРВ характерные скорости через КБ заметно меньше, поэтому данная формула не применима. Для моделирования режима старта при  $C_{H_2} < 1\%$  (по объему) используется выражение



**Рис. 11.** Производительность РВК-500 при различных режимах.  
1 – Р4, эксперимент; 2 – Р5, эксперимент; 3 – Р6, эксперимент; 4 – расчет  $D_{old}$ ; 5 – расчет  $D_{new}$

$D_{old} = D(t, C_{H_2}, p)$  с квадратичной зависимостью по  $C_{H_2}$ . Здесь  $t$ ,  $C_{H_2}$ ,  $p$  – температура потока, концентрация водорода и давление на входе в реактор, а  $\bar{U}$  – средняя скорость потока на входе в ПКРВ.

В настоящей работе представлены, главным образом, результаты моделирования штатных режимов работы ПКРВ РВК-500 (условия “покоящейся” среды). Для этих режимов выражения  $D = D(t, C_{H_2}, \bar{U})$  и  $D = D(t, C_{H_2}, p)$  должны давать примерно одинаковый результат. Выражение для производительности  $D_{old} = D(t, C_{H_2}, p)$  не позволяет учитывать скорость внешнего натекания потока на реактор, но оно может быть использовано для упрощенных моделей ПКРВ типа “черный ящик” (без моделирования течения внутри реактора). Это выражение используется при моделировании развития аварийных ситуаций в защитной оболочке АЭС и имеет большое практическое значение.

Зависимость  $D_{new}$  в настоящее время (из-за ресурсоемкости соответствующих моделей ПКРВ) может быть применена только для обоснования использования выражения  $D_{old}$  в упрощенных моделях. На рис. 10 представлены результаты расчетов по зависимостям производительности ПКРВ РВК-500  $D_{old}$ ,  $D_{new}$  и результаты экспериментов, полученные при обработке данных дискретной системы измерений. Как видно на этом рисунке, для штатных режимов (Р2, Р3п, Р7) выражения  $D = D(t, C_{H_2}, \bar{U})$  и  $D = D(t, C_{H_2}, p)$  дают близкий результат, но для режима натекания (Р19п) расхож-

дение становится значительным, и результаты расчета по выражению  $D_{new} = D(t, C_{H_2}, \bar{U})$  существенно лучше соответствуют данным эксперимента. При этом использование для режимов натекания выражения  $D_{old}$  в упрощенных моделях будет давать консервативную оценку производительности реактора.

На рис. 11 показаны экспериментальные и расчетные данные по производительности ПКРВ РВК-500 ( $D_{old}$ ,  $D_{new}$ ) в зависимости от объемной доли водорода на входе в ПКРВ. Параметры на входе соответствовали начальным условиям экспериментов Р4–Р6.

Анализ рис. 10 и 11 показывает, что для штатных режимов работы ПКРВ РВК-500 обе расчетные зависимости  $D_{old}$  и  $D_{new}$  дают близкие значения, которые при  $C_{H_2} < 6\%$  (по объему) лежат в пределах погрешности экспериментальных данных. При  $C_{H_2} > 6\%$  (по объему) некоторые расчетные точки располагаются ниже экспериментальных значений и представляют собой консервативную оценку производительности реактора.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты экспериментальных и расчетных исследований для штатных режимов работы и для режима с натеканием потока находятся в хорошем соответствии.

2. Данные, полученные при проведении экспериментов, подтверждают возможность использования упрощенных моделей типа “черный ящик” для консервативных оценок водородной взрывобезопасности на АЭС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Инженерная** модель пассивного каталитического реактора водорода / С.Л. Соловьев, С.Г. Калякин, А.В. Кошечев, А.В. Шишов, В.И. Шандра, М.А. Стародубцев, М.К. Седов // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 3. С. 135–142.
- CFD-моделирование** работы ПКРВ РВК-500 в условиях восходящего потока парогазовой смеси / А.В. Кошечев, М.К. Седов, М.А. Стародубцев, А.В. Шишов, А.А. Шукин // Тр. XVIII Междунар. конф. “Супервычисления и математическое моделирование”. Саров, 23–26 мая 2022 г. [https://doi.org/10.53403/9785951505279\\_2023\\_208\\_222](https://doi.org/10.53403/9785951505279_2023_208_222)
- Трехмерное** моделирование перемешивания среды в защитной оболочке АЭС в ходе развития тяжелых аварий / А.А. Игнатьев, Е.Э. Авдеев, Р.Б. Поваренский, В.О. Капица, В.О. Кухтевич, С.Е. Семашко // Атомная энергия. 2022. Т. 133. Вып. 3. С. 151–156.
- Cremer I., Tap R., Hupp M.** Updated modelling and simulation of hydrogen recombination in full-scale containment analyses // The 19th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics

- (NURETH-19). Brussels, Belgium, 6–11 March 2022. Log No. 35508.
5. **Гармонизация** подходов к оценке эффективности и пределов безопасного функционирования пассивных каталитических рекомбинаторов: системная модель / И.А. Кириллов, Н.Л. Харитонов, В.А. Симоненко, Е.В. Безгодков // *Атомная энергия*. 2021. Т. 131. Вып. 4. С. 183–191.
  6. **Расчеты** горения водород-кислородной смеси под куполом ядерного реактора при тяжелой запроектной аварии / И.В. Глазырин, А.В. Карпеев, В.А. Константинов, О.Г. Котова, Н.А. Михайлов, А.А. Надольский, А.В. Павленко, В.А. Симоненко, А.Н. Слесарева, А.В. Хмелев, О.В. Шульц // *Материалы IV науч. семинара “Моделирование технологии ядерного топливного цикла”*. Снежинск, 26–30 января 2015 г. Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2015.
  7. **Halouane Y., Dehbi A.** CFD prediction of hydrogen passive autocatalytic recombiner performance under counter-current flow conditions // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2020. V. 45. Is. 16. P. 10247–10256. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.189>
  8. **Test procedure for hydrogen recombiners / E.V. Bezgodov, V.A. Simonenko, V.M. Kryukov, D.V. Frolov, A.V. Ushkov, I.A. Kirillov, N.L. Kharitonova, S.G. Kalyakin** // Available at SSRN. 2023. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4632566>

## Validation of the Numerical Model of the RVK-500 Hydrogen Recombinator

**S. G. Kalyakin<sup>a</sup>, A. V. Koshcheev<sup>a, \*</sup>, M. K. Sedov<sup>a</sup>, S. L. Solovyov<sup>a</sup>, E. V. Bezgodov<sup>b</sup>, V. V. Stakhanov<sup>b</sup>, and V. A. Simonenko<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> AO VNIIAES, Moscow, 109507 Russia

<sup>b</sup> Zababakhin RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinsk oblast, 456770 Russia

\*e-mail: avkosheev@vniiaes.ru

**Abstract**—If severe accidents occur at nuclear power plants with light water coolant, large quantities of hydrogen may be released as a result of the zirconium-steam reaction. In order to avoid explosive consequences, passive catalytic hydrogen recombiners (PCHR) are installed in the containment building (CB) to remove hydrogen flamelessly. To substantiate the hydrogen explosion safety of nuclear power plants using computer modeling, calculations of the state of the vapor-gas atmosphere inside the CB are performed, taking into account the presence of PCHR. Experimental data are needed to validate computational models of recombinators. The article presents the results of a comparison of experimental and calculated data on the characteristics of the RVK-500 hydrogen recombiner. A brief description of the BM-P experimental stand is given, on which, for the first time in Russia, it was possible to study the operation of an industrial recombiner in abnormal operating modes (start modes and modes with leakage flow). To simulate abnormal operating modes of the recombinator, a CFD model is used, which describes the flow inside the recombinator in a simplified formulation (based on volumetric energy sources and the concentration of components of the vapor-gas medium). A description of the CFD model used to solve the problem of simulating the operation of the BM-P stand with the RVK-500 recombinator installed (inside the measuring chamber) is presented. For the experimental mode with leakage flow, a detailed comparison was carried out with the results of calculations performed using sensor readings (temperature and concentration of components of the vapor-gas medium). In total, calculated and experimental data on the performance of the recombinator were compared for seven experimental modes, including the normal operation mode of the recombiner under conditions of a “quiet” environment.

**Keywords:** hydrogen recombinator, CFD model validation, hydrogen explosion safety, accident modeling, experiment, nuclear power plant