

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА СИСТЕМЫ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ РЕКОМБИНАЦИИ РАДИОЛИТИЧЕСКОГО ГАЗА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В ТОПЛИВНОМ РАСТВОРЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

А. А. Пикулев, В. Ю. Волгутов, Н. А. Шлячков, Д. А. Юнин, А. Р. Дягель, О. А. Жилкина, Е. Н. Беспалова, В. Н. Голубева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Статья поступила в редакцию 07.07.2020, после доработки – 30.09.2020, принята к публикации – 20.11.2020

Разработан макет системы каталитической рекомбинации (СКР) радиолитического газа, образующегося в топливном растворе гомогенного исследовательского ядерного реактора (ИЯР). Макет СКР состоит из каталитического блока, воздушного компрессора, конденсаторов паров воды, имитатора надтопливного пространства ИЯР, в котором происходит накопление водородно-кислородной смеси, и системы регистрации данных с датчиками водорода, давления и температуры. В каталитическом блоке использованы гранулированные палладиевые катализаторы промышленного изготовления и катализаторы, изготовленные в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Проведены исследования эффективности каталитической рекомбинации водородно-кислородной смеси при скорости ее поступления $0,45 \text{ dm}^3/\text{min}$ и скоростях циркуляции парогазовой смеси в макете СКР $4,5$ и $9,0 \text{ dm}^3/\text{min}$ в зависимости от количества каталитических сегментов в каталитическом блоке. Установлена динамика изменения концентрации водорода до и после каталитического блока, давления в газовом контуре макета СКР и температуры каталитических сегментов.

Ключевые слова: растворные ядерные реакторы, радиолитический топливный раствор, система каталитической рекомбинации водорода, испытательный стенд, каталитический блок, палладиевый катализатор, каталитическая утилизация радиолитического газа.

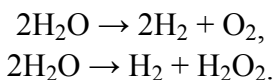
DEVELOPMENT AND TESTING OF A MODEL OF A SYSTEM AIMED AT CATALYTIC RECOMBINATION OF RADIOLYTIC GAS FORMED IN A FUEL SOLUTION OF RESEARCH NUCLEAR REACTORS / A. A. PIKULEV, V. Yu. VOLGUTOV, N. A. SHLYACHKOV, D. A. YUNIN, A. R. DYAGEL', O. A. ZHILKINA, Ye. N. BESPALOVA, V. N. GOLUBEVA // There is developed a model of a system aimed at catalytic recombination of radiolytic gas (SKR) formed in a fuel solution of a homogeneous research nuclear reactor (IYaR). The model of SKR consists of a catalytic block, air compressor, air vapor condenser, IYaR above-fuel space simulator where there takes place accumulation of hydrogen-oxygen mixture and the systems of data registration with hydrogen, pressure and temperature sensors are applied. In the catalytic block there are used industrially prepared granular palladium catalysts as well as catalysts produced in RFNC-VNIIEF. There were performed the researches of efficiency of hydrogen-oxygen mixture catalytic recombination at a rate of its ingress equal to $0.45 \text{ dm}^3/\text{min}$ and circulation rates of vapor-gas mixture in the SKR model equal to 4.5 и $9.0 \text{ dm}^3/\text{min}$ depending on the number of catalytic segments in the catalytic block. There was determined the dynamics of hydrogen concentration variation ahead of and behind the catalytic block, pressure in the gas contour and temperature in the catalytic segments.

Key words: solution nuclear reactors, fuel solution radiolysis, system of hydrogen catalytic recombination, test-bench, catalytic block, palladium catalyst, catalytic utilization of radiolytic gas.

Введение

Растворные ИЯР являются одним из эффективных инструментов для проведения исследований и испытаний материалов, приборов и узлов конструкций на радиационную стойкость при их разработке, а также для получения изотопов, используемых в разных сферах медицинской и научно-технической деятельности: ^{99}Mo , ^{89}Sr , ^{133}Xe , ^{131}I и др.

В качестве ядерного топлива в растворных ИЯР используют водные растворы солей урана – так называемый топливный раствор [1, 2]. В процессе работы растворного ИЯР на мощности в топливном растворе под действием осколков деления урана происходит интенсивный радиолиз воды с образованием водородно-кислородной смеси [3, 4]:



Радиолиз воды из состава топливного раствора приводит к двум негативным эффектам: 1) накоплению в корпусе активной зоны (АЗ) ИЯР радиолитического водорода и кислорода, сопровождающемуся постепенным ростом давления; 2) уменьшению количества воды в топливном растворе, вследствие чего увеличивается концентрация урана и изменяются нейтронно-физические параметры АЗ. Кроме того, если не принимать никаких мер, с течением времени концентрация водорода может превысить нижний предел взрывобезопасности и, в результате взрыва, привести к разгерметизации корпуса АЗ ИЯР [5–7].

Применяемые в настоящее время системы утилизации радиолитического газа, реализующиеся посредством искрового воспламенения на ИЯР ВИР-2М, ЯГУАР, ИГРИК и ИГРИК-2 [2], или системы пассивной каталитической рекомбинации водорода реакторов «Аргус» и «Аргус-М» [8–13] существенно ограничивают их облучательные возможности и эксплуатационные характеристики.

Утилизация радиолитического газа искровым воспламенением приводит к резкому падению давления в корпусе реактора и, как следствие, значительным провалам мощности. Это связано с резким расширением пузырьков радиолитического газа, находящихся в топливном растворе, приводящим к снижению плотности топлива и, в результате, к уменьшению реактивности АЗ. Кроме того, при резком уменьшении давления в корпусе реактора возможно паровое вскипание топливного раствора и временный переход ИЯР в подкритическое состояние [1]. Дополнительной проблемой является вероятность несрабатывания системы воспламенения, в результате чего радиолитический газ приходится сбрасывать из корпуса АЗ реактора в специальную емкость выдержки.

В качестве примера на рис. 1. представлена зависимость мощности реактора ВИР-2М и давления в надтопливном пространстве от времени. Моменты провалов мощности и давления соответствуют моментам сжигания гремучего газа.

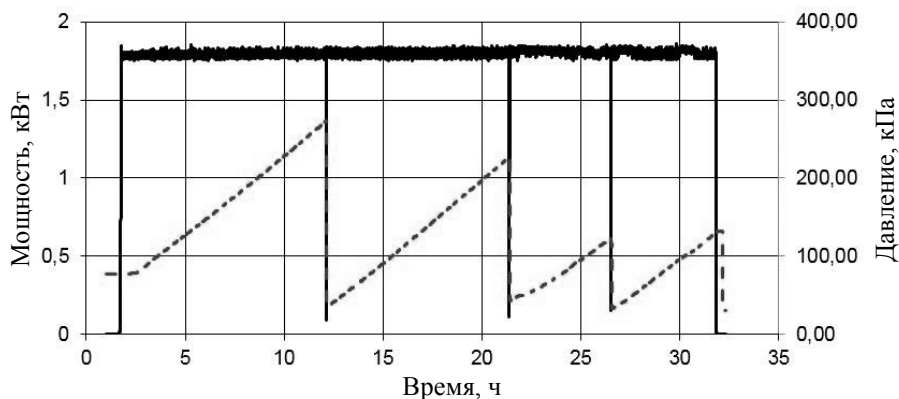


Рис. 1. Мощность реактора ВИР-2М (—) и давление в надтопливном пространстве АЗ (----) в зависимости от времени

Гомогенные ИЯР, оснащенные системой пассивной каталитической рекомбинации водорода (ПКР), также имеют ряд недостатков:

– ПКР использует эффект гравитационной тепловой конвекции, поэтому для создания необходимой скорости циркуляции парогазовой смеси система должна иметь большую высоту (около 3 м для ИЯР «Аргус» и 4 м для ИЯР «Аргус-М»). Размеры системы ПКР создают значительные неудобства при обеспечении ее биологической защиты, а также при проведении работ по обслуживанию (замена катализатора, датчиков температуры и давления);

– создаваемый в ПКР перепад давления не позволяет использовать катализаторы со средним и высоким газодинамическим сопротивлением (например, гранулированные катализаторы), а также исключает возможность использования дополнительных элементов, повышающих эффективность работы системы (в частности, защитных фильтров для улавливания короткоживущих изотопов и каталитических ядов);

– отсутствие управления скоростью циркуляции газовой смеси может привести к возникновению опасных режимов работы ПКР, при которых концентрация водорода в надтопливном пространстве корпуса ИЯР может превысить нижний предел взрывобезопасности, привести к разгерметизации корпуса реактора или ПКР и выходу радиоактивных аэрозолей в реакторные помещения.

Избавиться от недостатков, присущих как системе искрового поджига гремучего газа, так и системе ПКР, позволяет система каталитической рекомбинации водорода (СКР) с принудительной прокачкой парогазовой смеси. Такая система является универсальной и позволяет в широких пределах варьировать режимы работы ИЯР.

Использование СКР с принудительной прокачкой при работе растворного ИЯР в статическом режиме позволит, с одной стороны, избавиться от провалов мощности реактора

и стабилизировать термодинамические параметры топлива и парогазовой среды, а с другой – использовать катализаторы с низким, средним или высоким газодинамическим сопротивлением и гарантировать обеспечение взрывобезопасности во всем рабочем диапазоне.

Целью настоящей работы являлось создание макета СКР с принудительной прокачкой парогазовой среды и экспериментальное определение возможности использования предложенной СКР в составе растворных ИЯР для повышения их облучательных возможностей и улучшения эксплуатационных характеристик.

1. Состав и общее описание работы СКР

Схема газового тракта СКР растворного ИЯР представлена на рис. 2. В состав СКР входят следующие основные элементы:

1) запорная арматура (клапаны или задвижки высокого давления), отсекающая тракт СКР от корпуса АЗ во время работы ИЯР в импульсном режиме (для импульсных ИЯР);

2) холодильник № 1. Выполняет охлаждение парогазовой смеси и конденсацию паров воды, поступающих из корпуса АЗ с целью снижения в ней влагосодержания;

3) каталитический блок. Осуществляет каталитическую рекомбинацию радиоактивных водорода и кислорода на поверхности каталитических элементов;

4) холодильник № 2. Осуществляет охлаждение парогазовой смеси, нагретой после каталитического блока;

5) насос. Обеспечивает циркуляцию парогазовой смеси из корпуса АЗ в каталитический блок и обратно, т. е. создает гидравлический напор, необходимый для прокачки парогазовой смеси по тракту СКР;

6) система датчиков (температуры, давления и водорода).

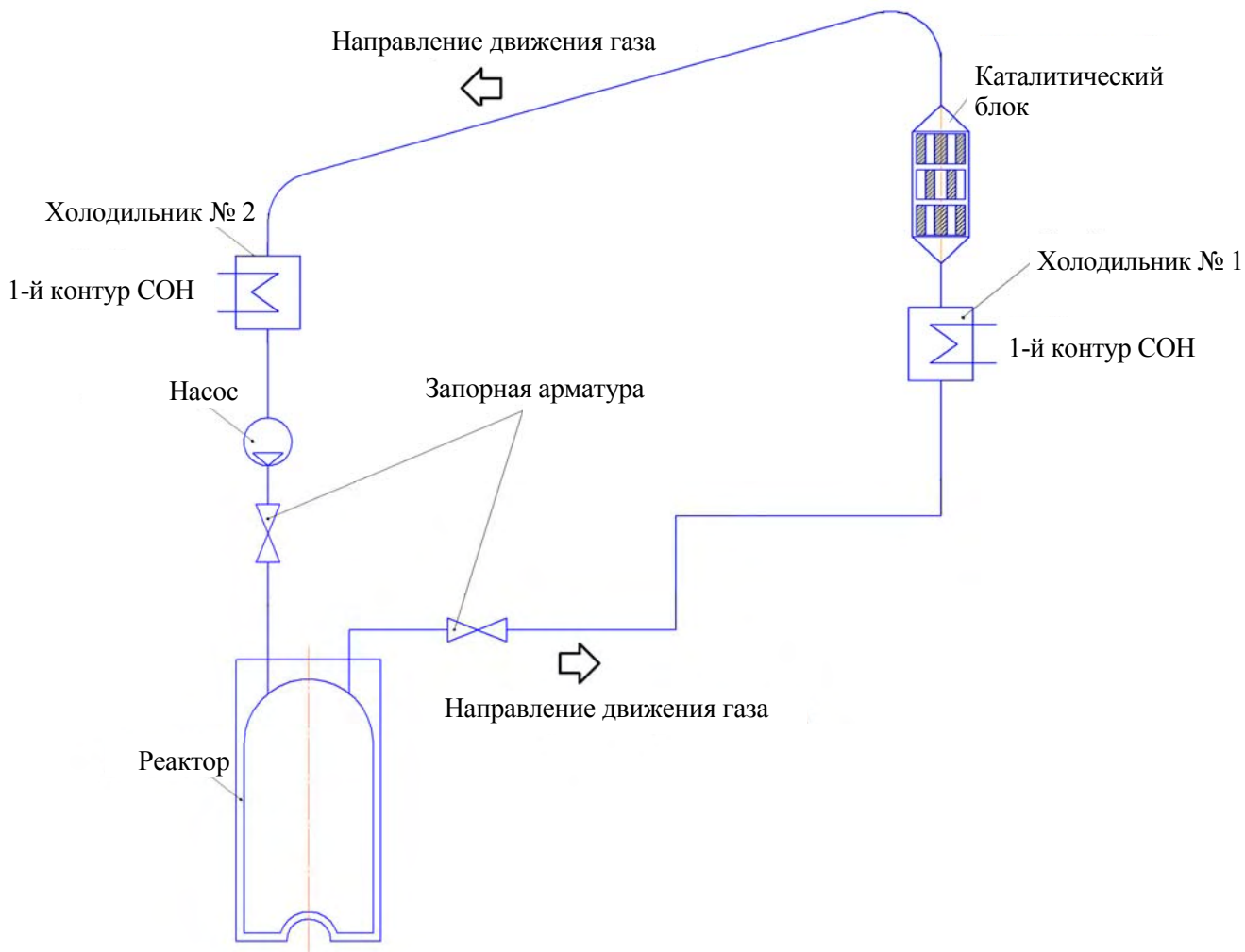


Рис. 2. Схема газового тракта СКР с принудительной циркуляцией

Цикл работы СКР состоит из следующих стадий:

1) поступление парогазовой смеси (содержит основной компонент – воздух, радиолитические водород и кислород, а также пары воды) из корпуса АЗ во входной патрубок СКР и далее в холодильник № 1;

2) охлаждение парогазовой смеси в холодильнике № 1 с целью снижения температуры и влагосодержания;

3) поступление парогазовой смеси в каталитический блок с целью рекомбинации водорода и кислорода;

4) реакция взаимодействия водорода с кислородом ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$) на каталитических элементах с образованием на выходе из каталитического блока парогазовой смеси с низким содержанием водорода;

5) охлаждение парогазовой смеси в холодильнике № 2 с целью снижения температуры и влагосодержания;

б) возвращение очищенной от водорода и охлажденной парогазовой смеси и сконденсированной воды в корпус АЗ.

2. Расчетная теплогидравлическая модель СКР

Для предварительного определения термодинамических и гидравлических параметров СКР, необходимых для безопасной утилизации радиолитического газа, была разработана расчетная модель газового контура СКР и проведен цикл параметрических расчетов.

Расчет проводили для газа, состоящего из воздуха (объемная доля 78 %) и водяного

пара (объемная доля 22 %), циркулирующих в газовом контуре СКР. Температура паровоздушной смеси в корпусе АЗ составляла 60 °С, относительная влажность – 100 %. При проведении расчетов полагалось, что выход радиолитического газа для раствора уранил-сульфата с концентрацией ~70 г/л в воде (параметры топлива ИЯР ВИР-2М) составляет 4,5 л/МДж [3].

В расчетной модели гидравлическим сопротивлением радиолитических газов ввиду их малых концентраций пренебрегали и считали, что динамическая вязкость смеси имеет аддитивный характер, а стенки трубопроводов являются абсолютно гладкими.

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты расчета гидравлических потерь ΔP , температуры катализатора T , концентрации водорода C_{H_2} при работе растворного ИЯР в статическом режиме на мощности 15 и 30 кВт в зависимости от скорости прокачки парогазовой смеси в контуре СКР.

Результаты проведенных расчетов показали, что для обеспечения взрывобезопасной концентрации водорода (объемная доля – не бо-

лее 4 %) скорость прокачки парогазовой смеси в контуре СКР при работе реактора на мощности 15 кВт должна быть не менее 7 м³/ч, а для мощности реактора 30 кВт – не менее 12 м³/ч.

Результаты расчетов по разработанной теплогидравлической модели были использованы для определения параметров прокачного устройства и каталитического блока макета СКР, обеспечивающих концентрацию водорода на взрывобезопасном уровне.

3. Разработка макета СКР и постановка эксперимента

3.1. Разработка макета каталитического блока

Основным элементом макета СКР являлся каталитический блок. В настоящей работе были проведены эксперименты с двумя типами катализаторов:

- промышленным гранулированным палладиевым катализатором К-ПГ с массовой долей палладия 1,8–2,0 %;

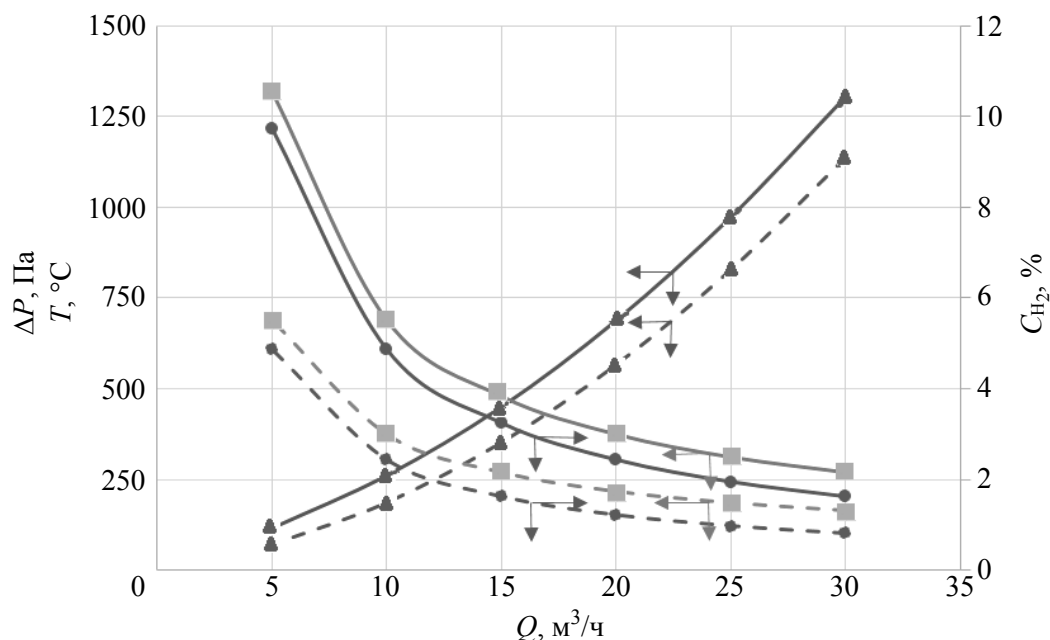


Рис. 3. Зависимости гидравлических потерь ΔP (\blacktriangle), температуры катализатора T (\blacksquare) и концентрации водорода C_{H_2} (\bullet) от скорости прокачки парогазовой смеси в контуре СКР при работе растворного ИЯР в статическом режиме: — — 30 кВт; ---- — 15 кВт

– разработанным в ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ гранулированным палладиевым катализатором (КАП) с массовой долей палладия 0,2, 0,6 и 1,0 % (КАП-02, КАП-06 и КАП-10). Катализаторы КАП с разной массовой долей палладия использовали для выравнивания теплового фронта и снижения температуры каталитических элементов в каталитическом блоке.

Отработку лабораторной технологии изготовления гранулированных палладиевых катализаторов КАП проводили методом пропитки гранул оксида алюминия [14]. Процесс изготовления катализаторов КАП состоял из трех стадий:

- определения удельной влагоемкости гранул оксида алюминия;
- пропитки палладиевым раствором гранул оксида алюминия;
- восстановления палладия на поверхности керамических гранул оксида алюминия.

Восстановление керамических гранул, пропитанных палладиевым раствором, проводили при температуре 300 °С в потоке аргон-водородной смеси в течение 5 часов, а затем выдерживали при температуре 600 °С в течение одного часа.

Массовую долю палладия в катализаторе определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с возбуждением проб в аргонной высокочастотной индукционной плазме (АЭС-ИСП). Массовая доля палладия в катализаторах составила:

- КАП-02 – $(0,160 \pm 0,024) \%$,
- КАП-06 – $(0,634 \pm 0,095) \%$,
- КАП-10 – $(1,05 \pm 0,16) \%$.

После изготовления катализатора КАП была проведена сборка каталитических элементов. Они представляли собой металлические сетки, в ячейки которых устанавливали гранулы катализатора К-ПГ или КАП. Сборка из 10 каталитических элементов формировала каталитический сегмент (КС) с массой катализатора К-ПГ по 25 г в каждом или массой катализатора КАП по 38 г. Каталитический блок содержал от 2 до 4 каталитических сегментов.

Макет СКР оснащали двумя типами каталитических блоков с промышленным катализатором К-ПГ и с катализаторами КАП-02, КАП-06 и КАП-10.

3.2. Сборка макета СКР

Сборку макета СКР проводили в соответствии с принципиальной схемой, представленной на рис. 4. После сборки и отладки основных элементов макета СКР была проведена калибровка датчиков давления и температуры и выполнена настройка программного обеспечения модульной измерительной системы NI PXIe-1062Q. Для автоматизированной регистрации давления в газовом контуре макета СКР и температуры в каталитических сегментах было написано программное обеспечение в среде LabVIEW [15].

Цикл работы макета СКР следующий:

- поступление водорода и кислорода через регуляторы расхода из блока подготовки газов в контейнер 4 (рис. 4) с топливным раствором 5 со скоростью 0,45 дм³/мин;
- поступление парогазовой смеси из контейнера через первый конденсатор паров воды 7 в каталитический блок 9 со скоростью $(4,5 \pm 0,3)$ или $(9,0 \pm 0,3)$ дм³/мин. Прокачка парогазовой смеси обеспечивается воздушным компрессором 15;
- реакция каталитического окисления водорода на каталитических элементах 10 с образованием паров воды;
- охлаждение парогазовой смеси на втором конденсаторе 7 и возвращение конденсата в контейнер (имитатор корпуса реактора).

Эксперименты по определению степени каталитической конверсии водорода на катализаторах КАП и К-ПГ проводили при скорости поступления водородно-кислородной смеси 0,45 дм³/мин, двух скоростях циркуляции парогазовой смеси в газовом контуре, $(4,5 \pm 0,3)$ и $(9,0 \pm 0,3)$ дм³/мин, и количестве каталитических сегментов в каталитическом блоке от 2 до 4.

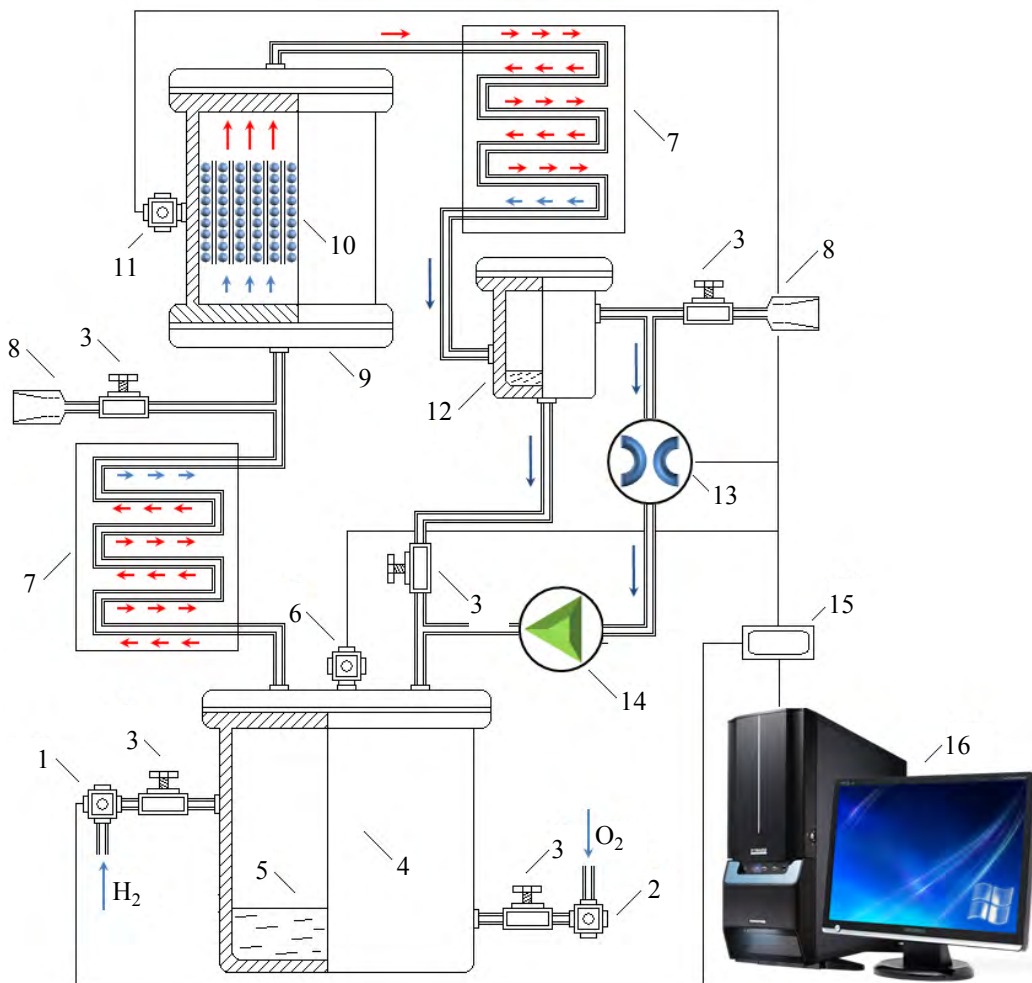


Рис. 4. Принципиальная схема макета СКР: 1 и 2 – регуляторы расхода водорода и кислорода соответственно; 3 – вентильные газовые краны; 4 – металлический контейнер; 5 – модельный топливный раствор; 6 – датчик давления; 7 – конденсатор паров воды; 8 – шлифы для отбора газовых проб; 9 – каталитический сегмент; 10 – каталитические элементы; 11 – датчик температуры; 12 – сборник сконденсированной воды; 13 – расходомер; 14 – воздушный компрессор; 15 – система регистрации данных; 16 – ПК

3.3. Порядок проведения экспериментов

Эксперименты на макете СКР проводились следующим образом.

1. Запускалось программное обеспечение на ПК 16 и включался воздушный компрессор Gardner Denver 2BH1300-7AV15 14, затем с помощью крана тонкой регулировки задавалась скорость циркуляции газовой смеси ($4,5 \pm 0,3$) $\text{дм}^3/\text{мин}$.

2. Открывались баллоны со сжатым водородом и кислородом и на блоке подготовки газов устанавливалась скорость поступления водорода и кислорода в стехиометрическом соотношении (2:1) в воздушную среду металлического контейнера на уровне $0,45 \text{ дм}^3/\text{мин}$.

3. Через 15, 30, 90 и 180 мин после установления скорости поступления водородно-кислородной смеси в макет СКР осуществлялся отбор проб газовой среды на двух участках газового контура 9 в стеклянные пробоотборники объемом $0,2 \text{ дм}^3$ и выполнялся газохроматографический анализ газовой среды на содержание водорода и кислорода. Исследования газовой среды проводили на газовом хроматографе GC-2014 «Shimadzu» по аттестованной методике измерений (свидетельство об аттестации № 3005/0041M-(RA.RU.311769-2016)-2016 от 2016 года).

4. Эксперимент повторялся при скорости циркуляции водородно-кислородной смеси

$(9,0 \pm 0,3)$ $\text{дм}^3/\text{мин}$. После этого в каталитическом блоке увеличивали количество каталитических сегментов и выполняли следующую серию экспериментов.

4. Результаты испытаний макета СКР

4.1. Давление парогазовой смеси в газовом контуре макета СКР

Регистрацию давления в газовом контуре макета СКР проводили датчиками МС 2000 с суммарной относительной погрешностью измерений $\pm 0,25\%$. На рис. 5 представлена динамика изменения давления в макете СКР, оснащенного двух-, трех- и четырехсекционным каталитическим блоком (КАБ) с КАП.

Результаты проведенных исследований показали, что давление в макете СКР, оснащенного КАБ с КАП, незначительно увеличивается при увеличении количества КС.

4.2. Температура каталитических сегментов

Регистрацию температуры на поверхности катализатора проводили термопарами с абсолютной погрешностью $\pm 2^\circ\text{C}$. В качестве примера на рис. 6 представлена динамика изменения температуры каталитических сегментов для четырехсекционного каталитического блока с КАП при разных скоростях циркуляции парогазовой смеси. Для трех- и двухсекционного блока с КАП зависимости имели аналогичный вид.

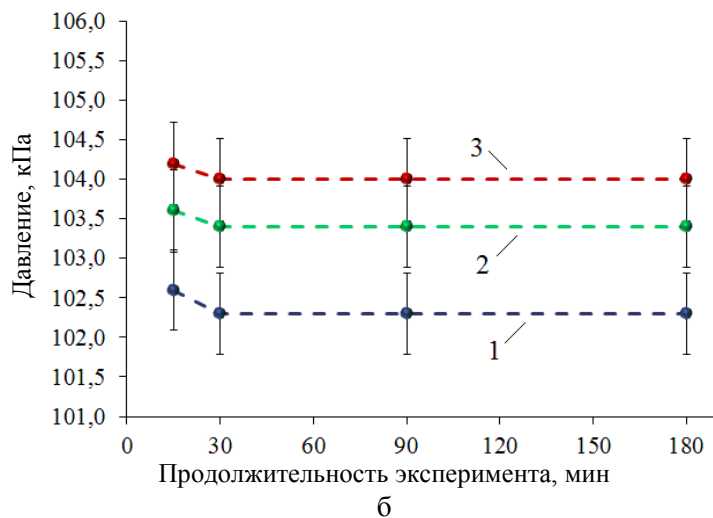
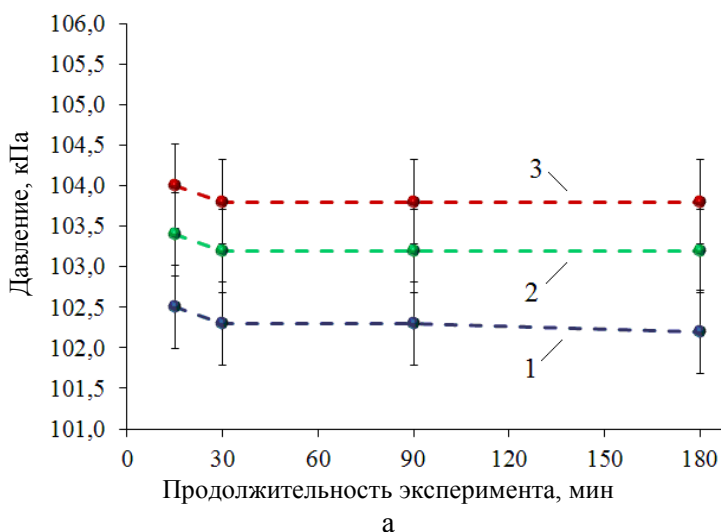


Рис. 5. Динамика изменения давления в газовом контуре макета СКР стенда, оснащенного КАБ с КАП, в зависимости от времени; скорость циркуляции газовой смеси – $4,6 \text{ дм}^3/\text{мин}$ (а) и $8,7 \text{ дм}^3/\text{мин}$ (б); КАБ состоит из двух (1), трех (2) и четырех (3) каталитических сегментов

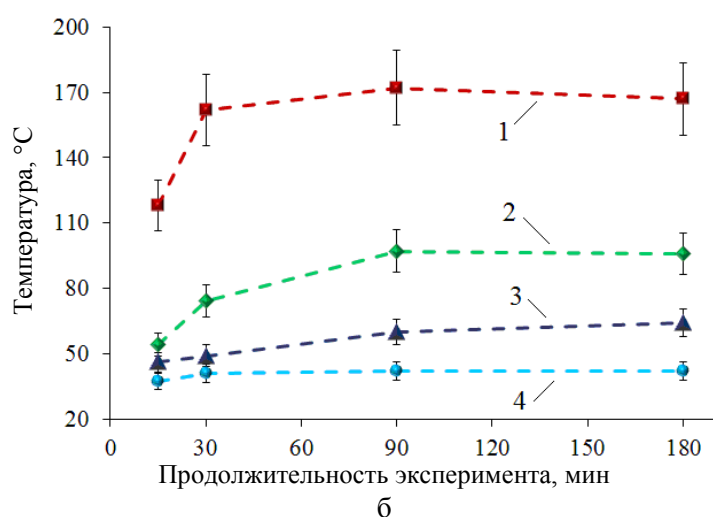
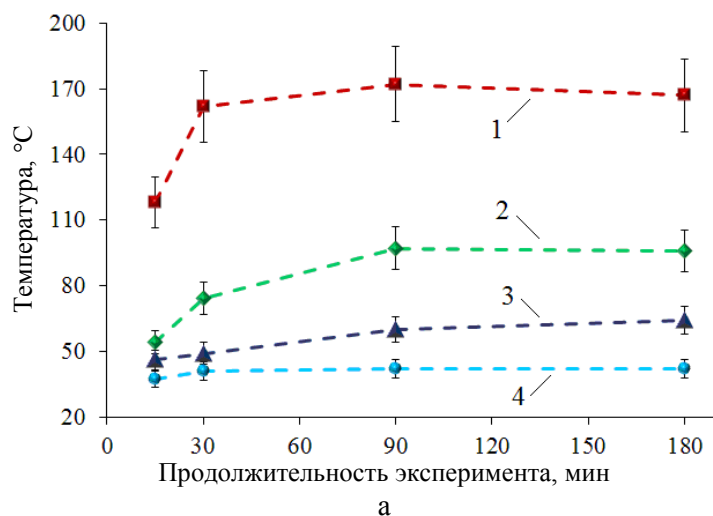


Рис. 6. Динамика изменения температуры каталитических сегментов с КАП в зависимости от времени; скорость циркуляции газовой смеси – 4,6 дм³/мин (а) и 8,7 дм³/мин (б); 1–4 температура в первом–четвертом каталитических сегментах соответственно

На основании представленных данных следует, что максимальная температура ~170 °C наблюдается для первого КС; для КС, расположенных ниже по потоку газа, температура заметно снижается и для четвертого КС не превосходит 40 °C. Проведенные эксперименты показывают, что расход парогазовой смеси незначительно влияет на температуру КС.

4.3. Концентрация водорода в газовом контуре макета СКР

Измерение концентрации водорода до и после каталитического блока в газовом контуре макета СКР проводили методом газовой

хроматографии. На рис. 7 представлена динамика изменения концентрации водорода до и после двух-, трех- и четырехсекционного КАБ при разных скоростях циркуляции парогазовой смеси. Динамика изменения концентрации водорода в газовом контуре макета СКР с катализатором К-ПГ имела аналогичный вид.

Из полученных данных установлено, что концентрация водорода до КАБ снижается при увеличении скорости циркуляции парогазовой смеси; практически не изменяется при увеличении количества каталитических сегментов в КАБ от одного до четырех.

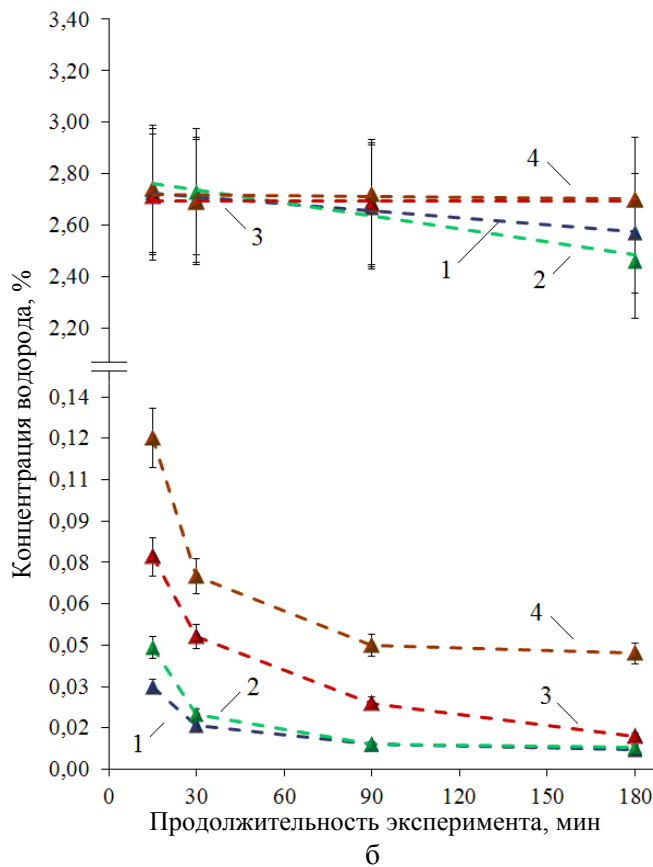
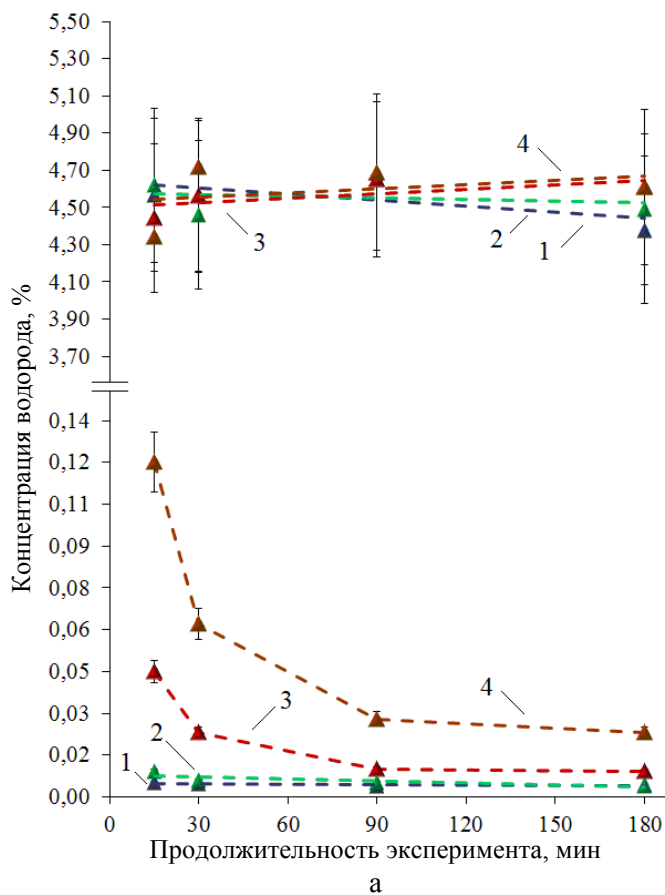


Рис. 7. Динамика изменения концентрации водорода до (верхние рисунки) и после (нижние рисунки) КАБ с КАП в зависимости от продолжительности эксперимента и скорости циркуляции газовой смеси (а – 4,6 дм³/мин; б – 8,7 дм³/мин); 1 – четыре КС в КАБ-2 с КАП-02, КАП-06 и КАП-10 и К-ПГ; 2 – три КС в КАБ-2 с КАП-02, КАП-06 и КАП-10; 3 – два КС в КАБ-2 с КАП-06 и КАП-10; 4 – два КС в КАБ-2 с КАП-02 и КАП-06

4.4. Степень каталитической конверсии водорода

Степень каталитической конверсии водорода в макете СКР рассчитывали по формуле

$$\alpha = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100\%,$$

где $C_{\text{вх}}$ – концентрация водорода на входе в каталитический блок; $C_{\text{вых}}$ – концентрация водорода на выходе из него.

Динамика изменения степени каталитической конверсии водорода (α , %) на катализаторе КАП представлена на рис. 8.

Из представленных данных следует, что степень каталитической конверсии водорода на катализаторе КАП сначала увеличивается с течением времени (за счет нагрева катализатора) и устанавливается на постоянном уровне через ~100 мин после начала работы; растет

с увеличением количества КС в каталитическом блоке; снижается при увеличении расхода парогазовой смеси с 4,6 до 8,7 дм³/мин. При использовании трех- и четырехсекционных каталитических блоков степень каталитической конверсии водорода на катализаторе КАП (после нагрева катализатора) составляет не менее 99,5 %.

5. Обсуждение результатов

Сравнение характеристик макета СКР, оснащенных разными катализаторами (собственного и промышленного изготовления), проводили по наибольшей зарегистрированной температуре каталитических сегментов, давлению и концентрации водорода до и после каталитического блока и по степени каталитической конверсии водорода.

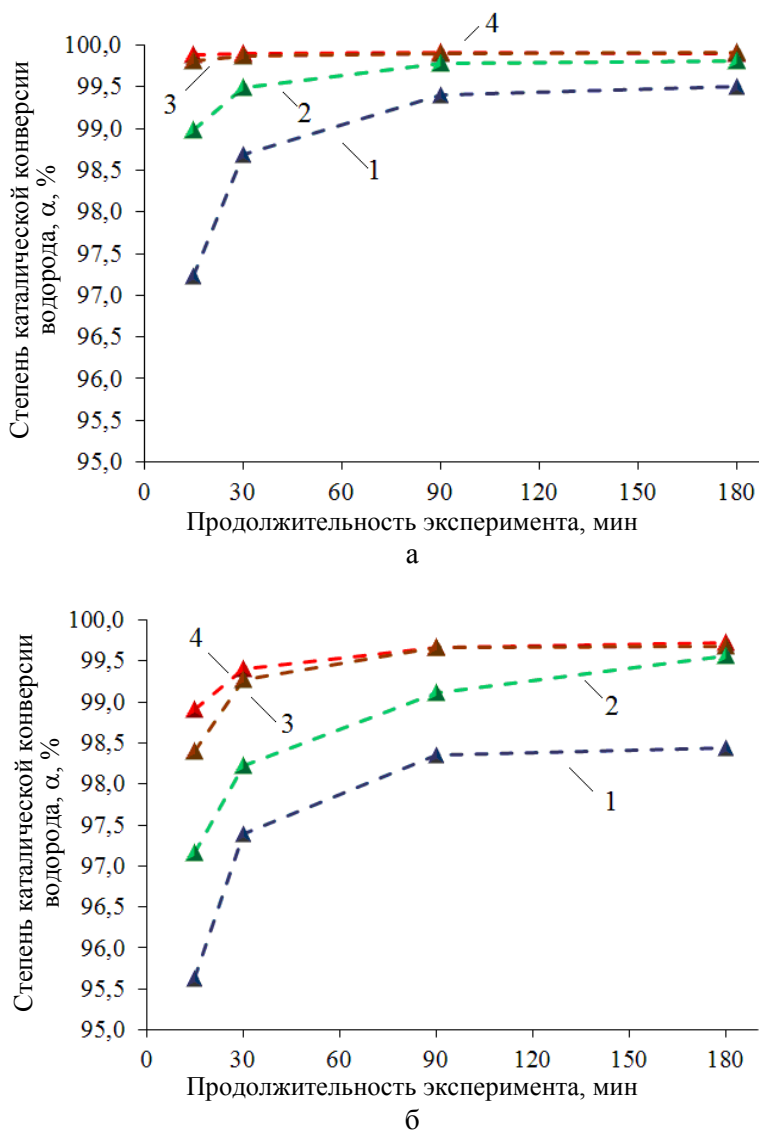


Рис. 8. Динамика изменения степени каталитической конверсии водорода в КАБ с КАП в зависимости от количества каталитических сегментов при разных скоростях циркуляции газовой смеси (а – 4,6 дм³/мин; б – 8,7 дм³/мин); 1 – два КС в КАБ-2 с КАП-02 и КАП-06; 2 – два КС в КАБ-2 с КАП-06 и КАП-10; 3 – три КС в КАБ-2 с КАП-02, КАП-06 и КАП-10; 4 – четыре КС в КАБ-2 с КАП-02, КАП-06 и КАП-10 и К-ПГ

Основные характеристики каталитических блоков КАБ с КАП и КАБ с К-ПГ представлены на рис. 9.

Из представленных данных следует:

- наибольшая температура в КАБ с К-ПГ составляет (215 ± 10) °С при скорости циркуляции парогазовой смеси 4,6 дм³/мин и (175 ± 10) °С при 8,7 дм³/мин; температура в КАБ с КАП составляет (185 ± 10) °С при 4,6 дм³/мин и (165 ± 10) °С при 8,7 дм³/мин;

- наибольшее давление в газовом контуре макета СКР, оснащенного катализаторами

- КАП и К-ПГ, достигается для четырех КС в КАБ и составляет $(104,0 \pm 1,0)$ кПа;

- наибольшая концентрация водорода до КАБ с К-ПГ и до КАБ с КАП при скоростях циркуляции парогазовой смеси 4,6 и 8,7 дм³/мин составляет $(5,0 \pm 0,5)$ % и $(3,0 \pm 0,3)$ % соответственно;

- наибольшая концентрация водорода после КАБ с К-ПГ или с КАП не превышает $(0,45 \pm 0,05)$ %;

- при оптимальных условиях степень каталитической конверсии водорода в КАБ как с К-ПГ, так и с КАП, достигает 100 %.

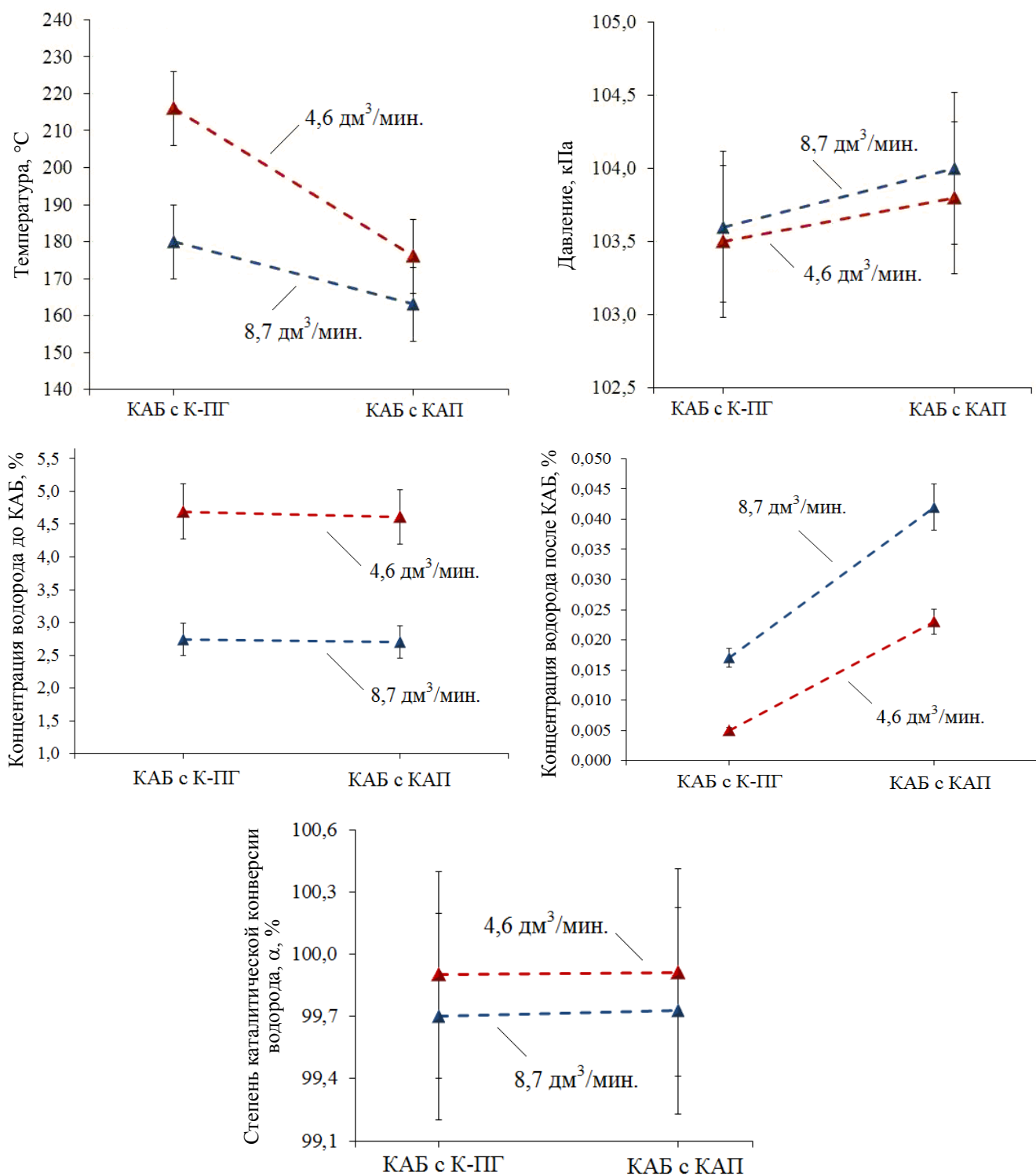


Рис. 9. Наибольшие значения степени каталитической конверсии водорода в каталитическом блоке макета СКР в зависимости от размещенного в нем катализатора и при разных скоростях циркуляции парогазовой смеси

Заключение

В работе дано описание макета системы каталитической рекомбинации радиолитического газа с принудительной прокачкой паро-

газовой смеси. Оработана лабораторная технология изготовления гранулированных палладиевых катализаторов КАП с массовой долей палладия 0,2; 0,6 и 1,0 % (КАП-02, КАП-06 и КАП-10). Катализаторы с разной массовой

долей палладия можно использовать для выравнивания поля температур по каталитическому блоку и снижения максимальной температуры каталитических элементов.

Проведены исследования эффективности каталитической рекомбинации водородно-кислородной смеси при скорости ее поступления 0,45 дм³/мин и скоростях циркуляции парогазовой смеси в макете СКР 4,5 и 9,0 дм³/мин в зависимости от количества каталитических сегментов в каталитическом блоке (от 2 до 4). Установлена динамика изменения концентрации водорода до и после каталитического блока, давления в газовом контуре макета СКР и температуры каталитических сегментов. Проведенные исследования показали, что степень каталитической конверсии водорода в каталитическом блоке на палладиевых гранулированных катализаторах составляет от 95 до 100 %, этого, безусловно, достаточно для поддержания концентрации водорода на взрывобезопасном уровне. Использование СКР с принудительной прокачкой парогазовой смеси в составе растворных ИЯР приведет к стабилизации их работы в статическом режиме и повышению водородной взрывобезопасности.

Список литературы

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеевко А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. Вып. 3. С. 3–15.

2. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы: Монография в 2 т. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. Т. 1. 149 с.

3. Бяков В. М., Ничипоров Ф. Г. Радиолиз воды в ядерных реакторах. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. 176 с.

4. Петерсон З., Уаймер Р. Химия в атомной технологии. – Москва: Атомиздат, 1967. С. 428.

5. International Atomic Energy Agency (IAEA), Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors, IAEA-TECDOC-1196. – Vienna, 2001.

6. Солдатов Г. Е., Голоднова О. С. О путях снижения риска пожаров в машинных залах АЭС // Атомкон. 2009. № 2 (3).

7. Kempself I. D. et al. Hydrogen Explosions – an Example of Hazard Avoidance and Control, IChemE, Symp. Series № 148, 523-539, 2001.

8. Афанасьев Н. М., Беневоленский А. М., Венцель О. В. и др. Реактор «Аргус» для лабораторий ядерно-физических методов анализа и контроля // Атомная энергия. 1986. Т. 61. Вып. 1, С. 7–9.

9. Григорук Д. Г., Келлер В. Д., Христенко Е. Б., Церцвадзе Э. Н. Пассивный каталитический рекомбинатор водорода с двухъярусным корпусом // Электрические станции. 2013. № 5. С. 10–12.

10. Passive Autocatalytic Recombiner – Mode of access: www.us.areva.com. – Date of access: 11.08.2016.

11. <http://retech.ru/sistemyi-udaleniya-vodoroda/pkrv>.

12. Пат. № 2069582 РФ МПК № 92016320/26. Устройство для рекомбинации водорода и кислорода / Райнхард Хек, Карл-Хайнц Швенк // Изобретения. 1996. № 33.

13. Пат. № 2499305 РФ МПК № 2012143367/07. Пассивный каталитический рекомбинатор водорода и кислорода с равномерной нагрузкой на площадь каталитического элемента / Д. Е. Кошманов, В. А. Шепелин // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 32.

14. Кулакова И. И., Лисичкин Г. В. Каталитическая химия. Часть 1. Основы катализа. – Москва: МГУ им. М. В. Ломоносова. 2014.

15. Bress. T. Effective LabVIEW Programming. – NTS Press. 2013. 720 p.

Контактная информация –

Пикулев Алексей Александрович,
начальник отдела ИЯРФ
РФЯЦ-ВНИИЭФ
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2020, вып. 4, с. 4–16.