

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ РЕКОМБИНАЦИИ ДЛЯ РАСТВОРНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА

*Дягель Антон Русланович (otd4@expd.vniief.ru), Пикулев Алексей Александрович,
Глухов Леонид Юрьевич, Турутин Сергей Львович, Юнин Денис Анатольевич,
Кубасов Антон Александрович, Шуркаев Александр Васильевич, Табаков Сергей Олегович,
Авдеев Артем Дмитриевич*

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

В докладе представлено расчетное обоснование параметров системы каталитической рекомбинации (СКР), предназначенной для рекомбинации радиолитического газа (смесь водорода и кислорода), образующегося в активной зоне растворного исследовательского реактора.

Проведен комплексный расчет СКР, который включает 3-D расчет параметров парогазовой смеси в корпусе активной зоны реактора и в каталитическом блоке СКР и 1-D инженерный теплогидравлический расчет параметров СКР в целом. Полученные результаты демонстрируют возможность поддержания параметров парогазовой смеси (концентрация водорода, температура) в пределах взрывобезопасности, а полученные расчетные зависимости позволяют обосновать основные эксплуатационные пределы безопасной работы растворного реактора с системой СКР.

Ключевые слова: исследовательский ядерный реактор, радиолиз, гремучий газ, катализатор, рекомбинатор, система каталитической рекомбинации, теплогидравлический расчет.

CALCULATION VALIDATION OF OPERATION PARAMETERS OF CATALYTIC RECOMBINATION SYSTEM FOR SOLUTION-TYPE RESEARCH REACTOR

*Dyagel Anton Ruslanovich (otd4@expd.vniief.ru), Pikulev Alexey Alexandrovich,
Glukhov Leonid Yurievich, Turutin Sergey Lvovich, Yunin Denis Anatolievich,
Kubasov Anton Alexandrovich, Shurkaev Alexandr Vasilievich, Tabakov Sergey Olegovich,
Avdeev Artem Dmitrievich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

In the report there is presented a calculation validation of parameters of catalytic recombination system (CRS) aimed at recombination of radiolytic gas (mixture of hydrogen and oxygen) formed in the core of solution-type research reactor. There is performed complex calculation of CRS including 3-D calculation of steam-gas mixture parameters in the reactor core vessel and in the catalytic block of CRS and 1-D engineering thermal hydraulic calculation of CRS parameters as a whole. The obtained results demonstrate the possibility of keeping steam-gas mixture parameters (hydrogen concentration, temperature) within the limits of explosion safety, while the obtained calculation dependences make it possible to validate basic safe operation limits for solution-type reactor with CRS.

Keywords: research nuclear reactor, radiolysis, detonating gas, catalyst, recombiner, catalytic recombination system, thermal hydraulic calculation.

Введение

В настоящее время ведутся работы по модернизации исследовательской ядерной установки (ИЯУ) ВИР-2М, с целью повышения ее облучательных возможностей и улучшения эксплуатационных характеристик [1].

При модернизации в состав реактора будет включена система каталитической рекомбинации (СКР), предназначенная для непрерывного удаления продуктов радиолиза воды (радиолитических газов – водорода и кислорода) при работе реактора в статическом режиме [2].

Для отработки технических решений, заложенных в конструкцию СКР модернизированного ИЯР ВИР-2М (далее по тексту ИЯР ВИР-3), был разработан полномасштабный макет СКР. Для обоснования эксплуатационных параметров и условий обеспечения водородной взрывобезопасности для макета СКР и СКР из состава ИЯР ВИР-3 необходимо проведение комплекса теплогидравлических расчетов.

Описание газового тракта макета СКР

3D-модель макета СКР представлена на рис. 1.

Макет СКР состоит из следующих основных элементов:

Имитатор корпуса реактора. Цилиндрический сосуд, наполненный имитатором топливного раствора (водным раствором серной кислоты), имеющий в своей конструкции патрубки подвода водорода и кислорода из газовых баллонов, а также электронагреватель, что позволяет моделировать работу реактора на мощности с сопутствующим радиолизом воды.

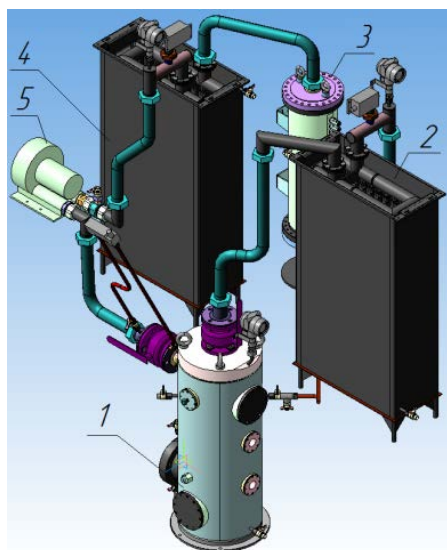


Рис. 1. Внешний вид макета СКР: 1 – имитатор корпуса реактора; 2 – холодильник № 1, 3 – каталитический блок, 4 – холодильник № 2, 5 – воздушный компрессор

Холодильник № 1. Рекуперативный теплообменник, в котором парогазовая смесь осушается путем конденсации паров воды и охлаждается до 30°C.

Каталитический блок. Цилиндрический металлический контейнер, с тремя внутренними отсеками. Каждый отсек выполнен в виде коаксиальных перфорированных цилиндров разного диаметра и торцевых крышек с прорезями. Таким образом, в закрытые с торцов цилиндры засыпаются гранулы катализатора, а открытые с торцов цилиндры, предназначены для прокачки парогазовой смеси.

Холодильник № 2. Конструктивно идентичен холодильнику №1. Конденсирует водяной пар, образовавшийся путем рекомбинации водорода и кислорода в каталитическом блоке, охлаждает до 80°C воздух, очищенный от водорода, кислорода и водяного пара.

Воздушный компрессор. Обеспечивает принудительную прокачку парогазовой смеси в тракте СКР.

Исходные данные для расчета макета СКР

Исходные данные для расчета приняты с учетом условий работы ИЯР ВИР-3:

- номинальная мощность реактора в статическом режиме – 20 кВт;
- номинальная производительность макета СКР по гремучему газу – 0,32 нм³/ч (5,4 нл/мин) (где нм³ – «нормальный кубический метр», нл – «нормальный литр», объем газа при нормальных условиях – давления 101,3 кПа и температуре 293 К), что соответствует выходу гремучего газа при мощности реактора 20 кВт;
- номинальная производительность макета СКР по водороду – 0,22 нм³/ч (3,6 нл/мин), что соответствует выходу водорода при мощности реактора 20 кВт;
- номинальный расход парогазовой смеси по контуру СКР – 20 нм³/ч (5,6 нл/с);
- рабочее давление в контуре макета СКР – не выше 10⁵ кПа (1 атм);
- температура парогазовой смеси на входе в холодильник № 1 – не более 90 °С;
- температура парогазовой смеси на выходе из холодильника № 1 – не более 30 °С;
- температура на выходе из холодильника № 2 – не более 80 °С.

Общие принципы расчета

В качестве упрощений расчета пренебрегаем теплообменом с окружающей средой, считаем, что динамическая вязкость μ обладает аддитивным характером, принимаем степень рекомбинации водорода в каталитическом блоке равной 100 %.

Парогазовая смесь состоит из следующих компонентов: воздух, водяной пар, водород, кислород.

Объемные доли водорода χ_{H_2} и кислорода χ_{O_2} рассчитываются исходя из удельного выхода гремучего газа 4,5 нл/МДж, общего объемного расхода парогазовой смеси, заданной в исходных данных, и стехиометрического соотношения компонентов гремучего газа (водорода и кислорода).

Объемную долю водяного пара $\chi_{вп}$ можно найти согласно закону Дальтона из соотношения парциального давления водяного пара и общего давления парогазовой смеси.

Объемная доля воздуха $\chi_{в}$ рассчитывается по остаточному принципу:

$$\chi_{в} = 1 - \chi_{H_2} - \chi_{O_2} - \chi_{вп}. \quad (1)$$

Динамическую вязкость компонентов парогазовой смеси можно найти по формуле [5]:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^m, \quad (2)$$

где μ_0 – динамическая вязкость газа при стандартных условиях ($T_0 = 273$ К), m – безразмерный показатель для конкретного газа.

Поскольку в качестве упрощения был принят аддитивный характер динамической вязкости, то вязкость парогазовой смеси вычисляется путем сложения парциальных долей компонентов:

$$\mu_{см} = \sum_i \chi_i \mu_i. \quad (3)$$

Плотности и теплоемкости компонентов парогазовой смеси в зависимости от температуры взяты из работ [3–5], данные параметры также обладают аддитивным характером:

$$\rho_{см} = \sum_i \chi_i \rho_i; \quad (4)$$

$$\rho_{см} C_p^{см} = \sum_i \chi_i \rho_i C_p^i. \quad (5)$$

Гидравлическое сопротивление i -го элемента газового тракта и состоит из двух слагаемых – гидравлических потерь напора на трение и местных гидравлических потерь:

$$\Delta P_i = \Delta P_{\text{три}} + \Delta P_{\text{ми}}. \quad (6)$$

Потери на трение можно найти согласно формуле (7), они зависят от геометрии элемента (протяженность l_i , диаметр или гидравлический диаметр d_i), плотности парогазовой смеси и скорости потока w_i , которую можно найти исходя из уравнения неразрывности [6].

$$\Delta P_{\text{три}} = \zeta_{\text{три}} \frac{l_i}{d_i} \frac{\rho_{смi} w_i^2}{2}. \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления в свою очередь зависит от режима течения и относительной шероховатости стенок $\delta_{ш}$ [6]:

$$\zeta_{\text{три}} = f \left(\text{Re}_i = \frac{w_i d_i \rho_{смi}}{\mu_i}, \delta_{ш} \right). \quad (8)$$

Местные потери на трение происходят в участках с изменением геометрии потока рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{\text{ми}} = \zeta_{\text{ми}} \frac{\rho_{смi} w_i^2}{2}. \quad (9)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta_{\text{ми}}$ рассчитывается по эмпирическим формулам в зависимости от характера и геометрии местного сопротивления [8].

Общие гидравлические потери напора тракта СКР (или макета СКР) складываются из потерь напора его элементов:

$$\Delta P = \sum_i \Delta P_i. \quad (10)$$

Температуру катализатора можно рассчитать исходя из мощности тепловыделения экзотермической реакции окисления водорода [7].

Результаты расчета макета СКР

В результате проведенных расчетов получены следующие параметры работы макета СКР в номинальном режиме:

- гидравлические потери напора в газовом тракте макета – 270 Па;
- максимальная температура парогазовой смеси в блоке рекомбинатора – 185°С;
- максимальная концентрация водорода 1,08 об. %.

Расчетные зависимости температуры катализатора и гидравлических потерь напора в макете СКР при постоянном объемном расходе парогазовой смеси 20 нм³/ч представлены на рис. 2: на рис. 2,а – от объемного расхода водорода, на рис. 2,б – от концентрации водорода.

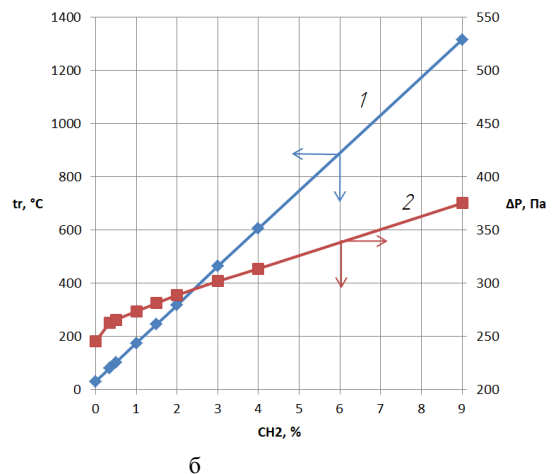
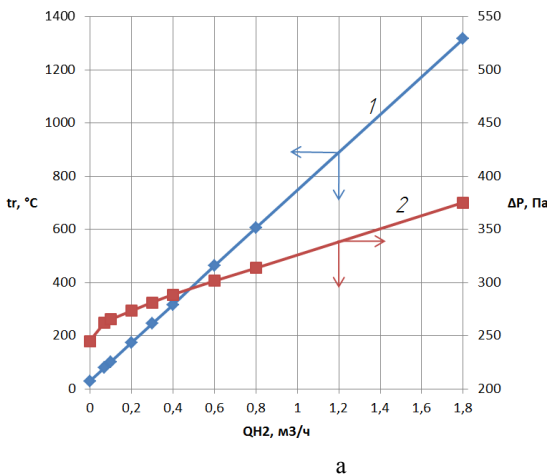


Рис. 2. Зависимость температуры катализатора t_r и гидравлических потерь напора ΔP при расходе парогазовой смеси $Q_{см} = 20$ нм³/ч: а – от расхода водорода Q_{H_2} : 1 – t_r , 2 – ΔP ; б – от концентрации водорода C_{H_2} : 1 – t_r , 2 – ΔP

Как видно, при концентрации водорода $C_{H_2} = 2,6\%$ (расходе $Q_{H_2} = 0,52 \text{ м}^3/\text{ч}$) парогазовая смесь и катализатор разогреваются до $t_r = 410^\circ\text{C}$, что является температурой самовоспламенения водорода и, соответственно, нижним пределом взрывобезопасности по температуре [8]. В то же время, значение концентрации $C_{H_2} = 2,6\%$ является нижним пределом взрывобезопасности по концентрации [8].

Заметим, что гидравлическое сопротивление газового тракта СКР пренебрежительно мало в сравнении с рабочим давлением тракта для всего рассматриваемого диапазона:

$$\frac{\Delta P_{\max}}{P_{\text{раб}}} \cdot 100\% = \frac{375,1 \text{ Па}}{90000 \text{ Па}} \cdot 100\% = 0,42\%. \quad (11)$$

На рис. 3 представлены зависимости концентрации водорода, рис. 3,а, температуры катализатора, рис. 3,б, и гидравлических потерь напора, рис. 3,в, от объемного расхода парогазовой смеси в газовом контуре макета СКР.

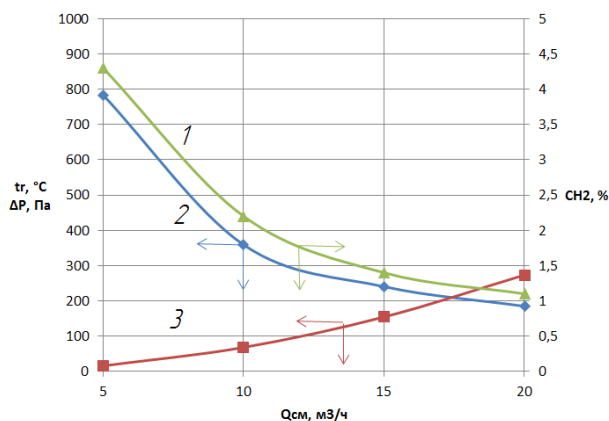


Рис. 3. Зависимость концентрации водорода C_{H_2} , температуры катализатора t_r и гидравлических потерь напора ΔP от объемного расхода парогазовой смеси $Q_{\text{см}}$: 1 – C_{H_2} , 2 – t_r , 3 – ΔP

Температура самовоспламенения водорода 410°C достигается при объемном расходе $Q_{\text{см}} = 9,2 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Нижняя граница взрывобезопасности по концентрации $C_{H_2} = 2,6\%$ достигается при $Q_{\text{см}} = 8,8 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Следовательно, при номинальном расходе водорода $Q_{H_2} = 0,22 \text{ м}^3/\text{ч}$ сумарный расход парогазовой смеси должен быть не ниже $Q_{\text{см}} = 9,2 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Описание газового тракта СКР

В качестве основы для расчета СКР была использована конструкция полномасштабного макета СКР, с той разницей, что трубопроводы, соединяю-

щие имитатор корпуса реактора с компрессором и холодильником № 1, заменены на два патрубка, соединяющие надтопливное пространство корпуса реактора с газовым трактом СКР.

Разместить СКР планируется в бункере газового контура (ГК).

Исходные данные для расчета СКР

Расчеты проводились для следующих условий:

- номинальная мощность реактора в статическом режиме 20 кВт;
- общий расход гремучего газа (смеси водород + кислород) $0,32 \text{ м}^3/\text{ч}$ (5,4 нл/мин);
- расход водорода – $0,22 \text{ м}^3/\text{ч}$ (3,6 нл/мин);
- расход парогазовой смеси по контуру СКР – $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ (5,6 нл/с);
- давление в контуре СКР – 90 кПа;
- температура топливного раствора и парогазовой смеси в надтопливном пространстве корпуса реактора – 90°C .

Результаты расчета СКР из состава ИЯР ВИР-3

В результате проведенных расчетов были определены основные термогазодинамические параметры СКР ИЯР ВИР-3:

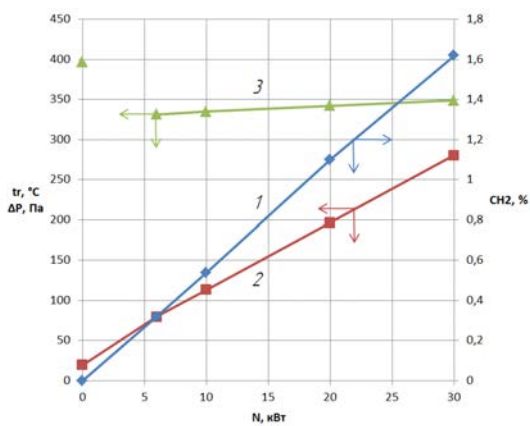
- гидравлические потери напора в газовом тракте СКР – 342,2 Па;
- максимальная температура парогазовой смеси в блоке рекомбинатора – $197,1^\circ\text{C}$;
- максимальная концентрация водорода 1,08 % об.

Также определены пределы безопасной эксплуатации СКР (с точки зрения обеспечения водородной взрывобезопасности):

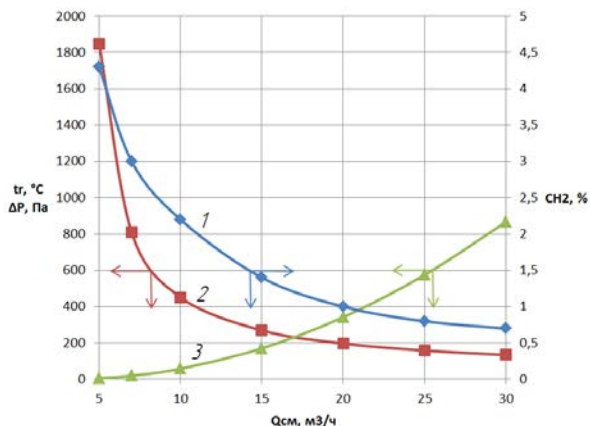
- максимальная мощность работы ИЯР в длительном статическом режиме (при расходе парогазовой смеси по контуру СКР $20 \text{ м}^3/\text{ч}$) – 45,5 кВт;
- минимально допустимый объемный расход парогазовой смеси (при мощности ИЯР 20 кВт) – $10,7 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Зависимости концентрации водорода, температуры катализатора и гидравлических потерь напора представлены на рис. 4: на рис. 4,а – от мощности ИЯР при расходе газовой смеси в контуре СКР $20 \text{ м}^3/\text{ч}$, на рис. 4,б – от объемного расхода парогазовой смеси при мощности ИЯР 20 кВт.

Результаты проведенных расчетов показали, что в статическом режиме работы ИЯР ВИР-3 (при работающей СКР) в корпусе АЗ и каталитическом блоке СКР не возникает условий для самовозгорания водорода.



а



б

Рис. 4. Зависимость концентрации водорода C_{H_2} , температуры катализатора t_r и гидравлических потерь напора ΔP : а – от мощности реактора N при расходе $20 \text{ м}^3/\text{ч}$: 1 – C_{H_2} , 2 – t_r , 3 – ΔP ; б – от объемного расхода парогазовой смеси $Q_{см}$ (мощность ИЯУ 20 кВт): 1 – C_{H_2} , 2 – t_r , 3 – ΔP

3-D расчет параметров парогазовой смеси в корпусе АЗ

Для определения выполнения условий взрывобезопасности в корпусе АЗ был проведен расчетный анализ процесса накопления радиолитических газов в надтопливном пространстве корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 с включенной системой СКР на статическом уровне мощности 30 кВт (максимальная проектная мощность 20 кВт с коэффициентом запаса 1.5). Массовый расход газовой смеси в контуре СКР – $18 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В результате установлено:

- объемные концентрации на выходе из реактора составляют для водорода – не более 2,5 %, для кислорода – 0,5 %;
- в верхней части внутренней полости корпуса АЗ не создается неветилируемого объема;
- установившаяся объемная концентрация водорода в газовой смеси на входе в СКР составляет 1,78 %, что ниже взрывобезопасной концентрации водорода 2,6 %;

На рис. 5 приведено установившееся поле расчетных значений амплитуды скорости газовой смеси по сечению расчетной области.

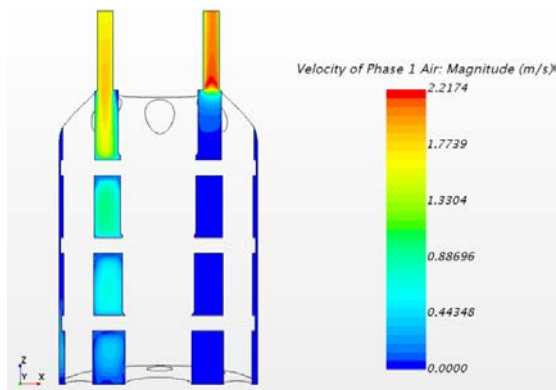


Рис. 5. Поле расчетных значений амплитуды скорости газовой смеси в корпусе АЗ

Оценка разогрева каталитического блока с гранулированным катализатором

Проведен расчет температуры паро-газовоздушной смеси и конструктивных элементов блока каталитического с гранулированным катализатором из состава СКР при работе ИЯР в статическом режиме на мощности 30 кВт и расходе газовой смеси в контуре СКР $18 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Результаты расчетов показали следующее:

- основная масса водорода, поступающего в каталитический блок, окисляется путем беспламенного горения на входном участке блока;
- максимальная температура парогазовой смеси и конструктивных элементов блока составляет около $300 \text{ }^\circ\text{C}$, что более чем на $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже температурного предела взрывобезопасности водорода;
- при расходе не менее $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ блок каталитический с гранулированным катализатором обеспечивает взрывобезопасность в контуре СКР для мощности работы ИЯР ВИР-3 до 40 кВт;

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод о соответствии параметров блока каталитического с гранулированным катализатором из состава СКР ИЯР ВИР-3 предъявляемым требованиям.

На рис. 6 представлены поля расчетных значений температуры при разогреве каталитического блока с гранулированным катализатором: на рис.6,а – для паро-газовоздушной смеси, на рис.6,б – для конструктивных элементов каталитического блока.

На рис. 7 представлена зависимость максимально-го локального разогрева катализатора от количества водорода, поступающего в каталитический блок. Как видно, для неперевышения взрывобезопасного значения температуры $410 \text{ }^\circ\text{C}$, объемная концентрация водорода на входе в блок не должна превышать 2,3 %. При расходе газо-воздушной смеси в контуре СКР на проектном уровне $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ данная концентрация водорода соответствует работе реактора на мощности 40 кВт.

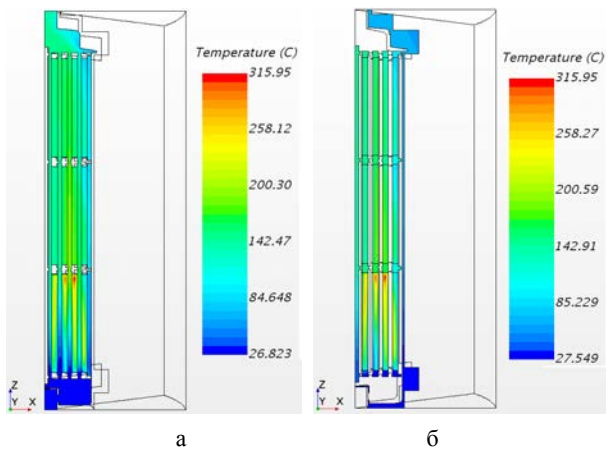


Рис. 6. Поле расчетного распределения температуры: а – для паровоздушной смеси, б – для конструктивных элементов каталитического блока

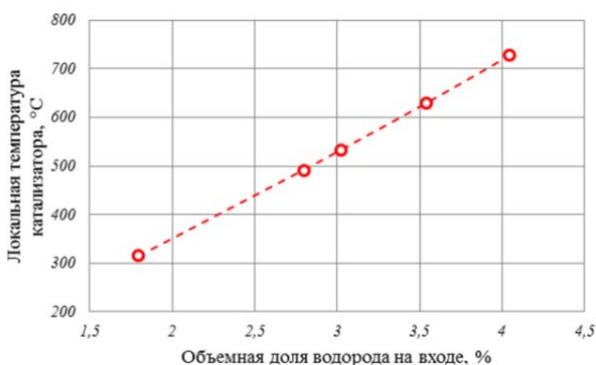


Рис. 7. Максимальный локальный разогрев катализатора в зависимости от количества водорода, поступающего в блок каталитический

Оценка разогрева каталитического блока с катализатором в виде сплошных колец

В связи с возможным перегревом единичных гранул катализатора, рассмотрен также вариант изготовления катализатора в виде сплошных керамических колец для обеспечения большего кондуктивного теплоотвода.

На рис. 8 показаны поля расчетных значений температуры при разогреве каталитического блока с катализатором в виде сплошных колец: рис.8,а – для паровоздушной смеси, рис.8,б – для конструктивных элементов блока каталитического.

Сравнение основных параметров блока каталитического с гранулированным катализатором и с катализатором из сплошных колец показало следующее:

- гранулированный катализатор имеет большую степень конверсии водорода – 99,2 %, чем катализатор в виде сплошных колец – 96,6 %. Это связано с большей рабочей поверхностью гранулированного катализатора;

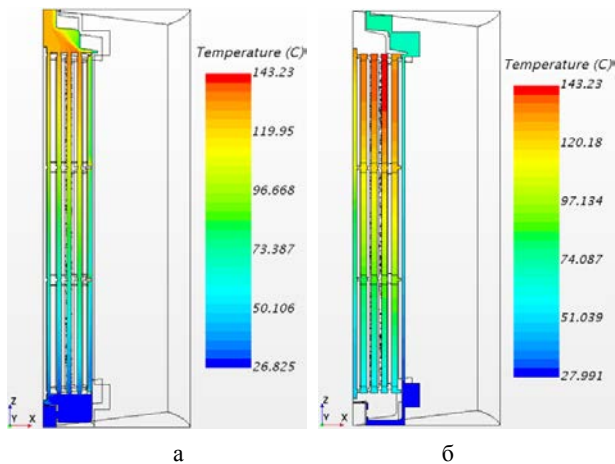


Рис. 8. Поле расчетного распределения температуры: а – для паровоздушной смеси, б – для конструктивных элементов блока каталитического

– для гранулированного катализатора максимальная температура конструктивных элементов каталитического блока и парогазовой смеси составляет 316 °C, что существенно выше, чем максимальная температура при использовании катализатора в виде кольцевых элементов (143 °C). Это связано тем, что для катализатора, изготовленного в виде кольцевых элементов, рекомбинация водорода достаточно равномерно распределена по всей высоте блока, что приводит к выравниванию температуры и отсутствию «горячих» точек, где наблюдаются локальные максимумы температуры.

Заключение

В работе представлены результаты комплексного расчета системы каталитической рекомбинации водорода для модернизированного ИЯР ВИР-2М, а также полномасштабного макета данной системы.

Инженерный 1-D расчет СКР модернизированного ИЯР ВИР-2М показал, что с точки зрения обеспечения взрывобезопасности СКР имеется более чем двукратный запас по мощности ИЯР (для проектного расхода газовой смеси 20 нм³/ч) и по расходу газовой смеси в контуре СКР (при работе ИЯР на максимальной проектной мощности 20 кВт). Полученные результаты показали, при работающей СКР не возникает условий для самовозгорания водорода, а максимальная температура катализатора не превышает предельно допустимого значения.

Для детального 3-D расчета были взяты наиболее опасные с точки зрения обеспечения водородной взрывобезопасности участки ИЯР ВИР-3: надтопливное пространство корпуса АЗ и каталитический блок из состава СКР.

Выявлено, что в конструкции корпуса АЗ отсутствуют области, где потенциально возможно скопление водорода. Кроме того, полностью обеспечивается взрывобезопасность в каталитическом блоке при

разогреве конструктивных элементов и парогазовой смеси, и объемной концентрации водорода при мощности 30 кВт (максимальная проектная мощность с коэффициентом запаса 1,5).

Список литературы

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеев А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. № 3. С. 3–15.

2. Бяков В. М., Ничипоров Ф. Г. Радиолит воды в ядерных реакторах. М: Энергоатомиздат, 1990.

3. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М: Атомиздат, 1968.

4. Вукалович М. П., Ривкин С. Л., Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М: Издательство стандартов, 1969.

5. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М: Издательство «наука», 1972.

6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М: Машиностроение, 1992.

7. Гороновский И. Т. Краткий справочник по химии. Киев: Наукова думка, 1987.

8. Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. М: ФИЗМАТЛИТ, 2008.