

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ГАЗОВ В РУ ВВЭР-1000 ВО ВРЕМЯ ППР

Воробьева С.Ю., Воробьев Ю.Б. (НИУ «МЭИ», Москва, Россия)

Введение

В докладе рассматривается проблема накопления вследствие радиолиза теплоносителя водорода, а также накопления кислорода, поступающего через разгерметизированные чехлы СУЗ. Моделирование транспорта водорода и кислорода в реакторных установках типа ВВЭР во время ППР позволило определить число часов, через которое в объемах будет получена взрывоопасная концентрация гремучей смеси.

1. Проблема накопления водорода вследствие радиолиза теплоносителя

При эксплуатации атомных электростанций следует уделять особое внимание безопасности. Опыт эксплуатации реакторных установок (РУ) типа ВВЭР показал, что в оборудовании первого контура могут образовываться взрывоопасные водородно-кислородные (водородно-воздушные) смеси. Согласно [1], взрывоопасные газовые смеси, образующиеся в газовых полостях РУ, – это водородно-кислородные (водородно-воздушные смеси) с объемной долей водорода от 4,1%. Накопление водорода в оборудовании РУ может привести к образованию взрывоопасной смеси и ее детонации.

На АЭС с РУ ВВЭР-1000 было зафиксировано три случая детонации взрывоопасной смеси:

1) Калининская АЭС, энергоблок №1 – 31.08.1989 г;

Произошел взрыв водорода под крышкой реактора ввиду непринятия мер по исключению накопления водорода вследствие радиолиза.

2) Запорожская АЭС, энергоблок №1 – 19.01.1991 г;

Взрыв водорода в коллекторе парогенератора энергоблока №1 из-за недостаточной вентиляции I-го контура во время ремонта.

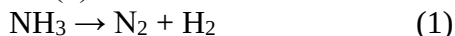
3) Калининская АЭС, энергоблок №3 – 26.11.2011 г.

При проведении проверки плотности оборудования РУ произошел взрыв водорода в верхних частях чехлов приводов стержней управления и защиты (СУЗ).

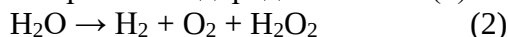
Главным фактором появления водорода в реакторных установках типа ВВЭР является радиолиз теплоносителя – разложение химических соединений под действием ионизирующего излучения, исходящего из реактора. Образующиеся при радиолизе теплоносителя газы находятся в растворенном состоянии.

Для предотвращения коррозионно-окислительных процессов с образованием продуктов радиолиза в теплоносителе первого контура поддерживается избыточная концентрация растворенного водорода. Также, в зависимости от водного режима, теплоноситель может содержать аммиак и азот. Исходя из концентраций аммиака, водорода и азота, а также интенсивности облучения, может происходить разложение аммиака с образованием водорода и азота или радиационное связывание азота с синтезом аммиака.

При наличии в теплоносителе первого контура аммиака идет его разложение с образованием водорода и азота по схеме (1):



При отсутствии аммиака в теплоносителе идет радиолитическое разложение воды с образованием водорода, кислорода и перекиси водорода по схеме (2):



Соответственно, образовавшиеся в ходе радиолиза теплоносителя газы будут скапливаться в газовых объемах.

Как видно из вышеперечисленного, проблема радиолиза очень важна, а так как накопление радиолитического водорода в определенных местах с необходимой концентрацией кислорода может привести к детонации. Необходимо изучать процесс транспорта водорода в реакторной установке. В настоящее время, для изучения этих и других процессов, происходящих в РУ, используют трехмерное приближение – коды вычислительной гидрогазодинамики (CFD) [2].

Проблема рассматривается на примере энергоблока №2 РУ ВВЭР-1000 В-320 Хмельницкой АЭС [3]. Основной задачей данного исследования являлась разработка расчетной модели транспорта водорода в надзонной части реактора, что позволило бы определить места накопления водорода и выявить наиболее опасные с точки зрения водородной взрывобезопасности места.

2. Разработка расчетных моделей

Для моделирования был выбран стояночный режим. Принималось, что ему соответствует две высоты уровня воды: на 400 мм ниже главного реакторного разъема (ГРР) (модель 1) и между входными и выходными патрубками (модель 2). Поэтому было создано две модели от уровня воды до крышки реактора.

Так, для модели 1 количество узлов сетки составило 4129780, а для модели 2 – 6790961. Разбиение на объемы для моделей 1 и 2 представлено на рисунках 1 и 2 соответственно.

Для дальнейшего моделирования модели передавались в ANSYS CFX, где задавались начальные и граничные условия для каждой модели. Принималось, что для стояночного режима температура теплоносителя на выходе из активной зоны не должна превышать 70°C, что определило температуру уровня. Также предполагалось, что температура под гермооболочкой составляет 30°C.

Так же предполагалась разгерметизация трех центральных чехлов СУЗ, для них задавалось относительное давление 0 Па и температура 30°C. Расход водорода с поверхности воды определяется текущим парциальным давлением водорода над поверхностью воды и его транспортом к поверхности жидкости. Однако на момент моделирования точных данных, позволяющих рассчитать расход водорода, не было, так что был задан пробный расход водорода 10^{-7} кг/с, а парциальное давление водорода рассматривалось как лимитирующий фактор. Средой являлась смесь газов. В начальный момент времени в объеме присутствует только азот, далее с поверхности воды поступает водород, а через разгерметизированные отверстия СУЗ могут поступать кислород и азот.

Также, на основе проводившихся ранее расчетов, было принято, что задача симметрична относительно двух главных рабочих патрубков.

Для уменьшения объема расчетной сетки и времени, затрачиваемого на расчет, без потери достоверности было принято решение для второй модели объемы ниже средней плиты БЗТ принять пористыми.

Модель турбулентности выбрана SST.

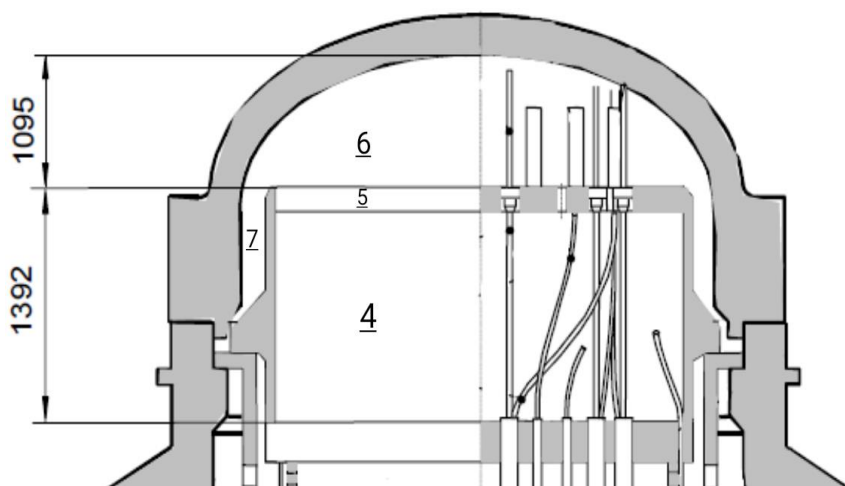


Рис. 1. Разбиение на объемы модели 1

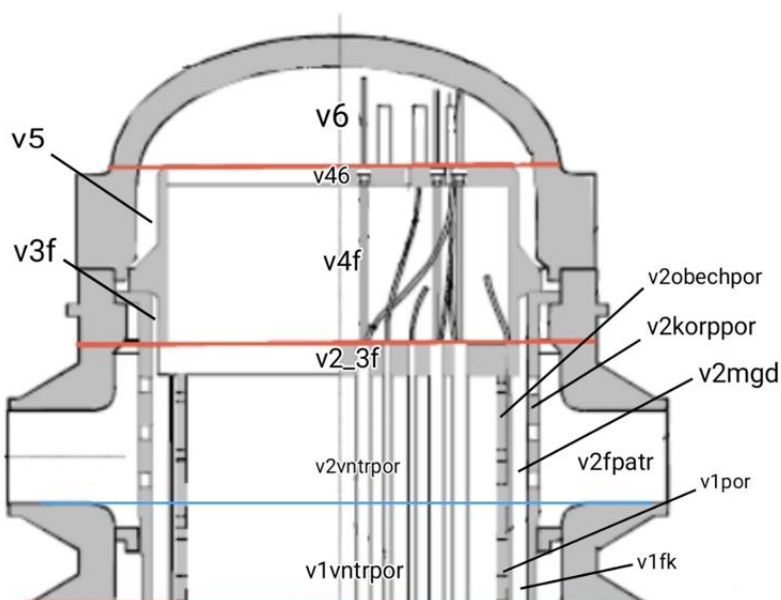


Рис. 2. Разбиение на объемы модели 2

3. Анализ расчета модели 1

Одним из основных параметров окончания расчета был критерий сходимости (Convergence Criteria). В качестве данного параметра было выбрано среднеквадратичное значение остаточных членов при очередной итерации – RMS. Для приемлемой точности расчета было принято численное значение $RMS = 10^{-4}$ и время моделирования процессов – 2000 секунд.

О качестве моделирования пристеночного слоя позволяет судить параметр y^+ . Так как рассматривается высокорейнольдсовая модель, его значение должно находиться в диапазоне от 20 до 100. Для данной модели наибольшее интервал значений y^+ составляет 17,7 – 30,2. На основании этого можно сделать вывод о достаточной точности моделирования пристеночного слоя.

Далее было получено распределение по объему линий тока (см. рис. 3). Как можно заметить, сначала поток прогревается в зоне между средней и верхней плитой блока защитных труб (БЗТ), затем, за счет конвекции, начинает циркулировать и проходит через верхнюю плиту БЗТ в объем под крышкой реактора. Там можно наблюдать

сложные нестационарные вихри. Далее поток замедляется, разворачивается, охлаждается и опускается обратно через верхнюю плиту БЗТ.

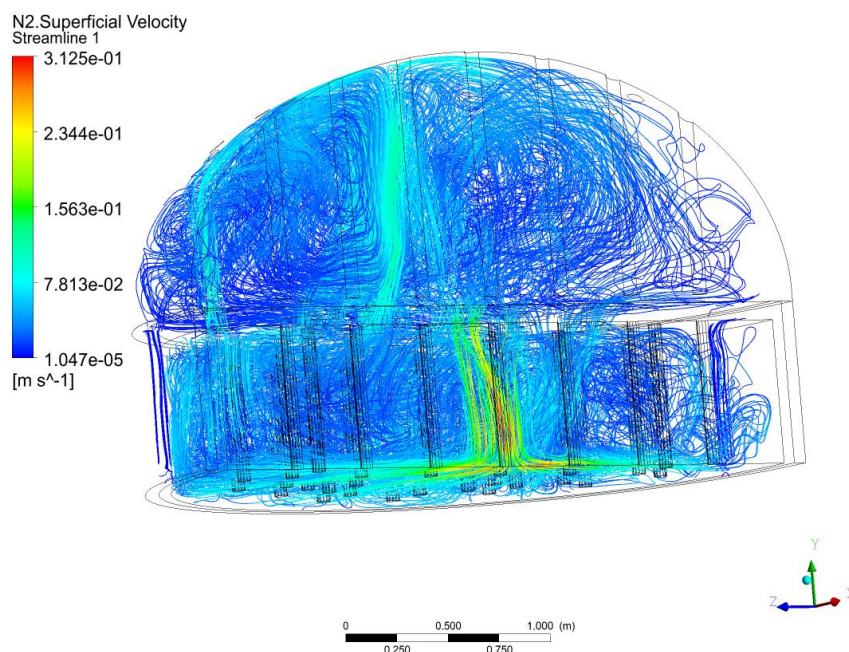


Рис. 3. Распределение по объему линий тока

Следующей была получена циркуляция водорода по объему (см. рис. 4). Как можно заметить, выходя с поверхности воды, водород циркулирует в вихрях вместе с основным потоком, прогревается и в следствие конвективного движения поднимается в верхний объем, под крышку. Далее он, что видно из рисунка 5, также закручивается в вихри, которые, подходя к некоторым из разгерметизированных отверстий СУЗов и в результате снижая местное давление, подсасывают из них кислород, который поступает в объем. На рисунке 6 можно увидеть, в какой момент времени водород покидает объем (расход через разгерметизированные отверстия СУЗ отрицательный), а в какой в объем поступает кислород (расход водорода равен нулю). Здесь можно заметить интересную тенденцию смены поступления/ухода через отверстия, что связано с нестационарными вихрями.

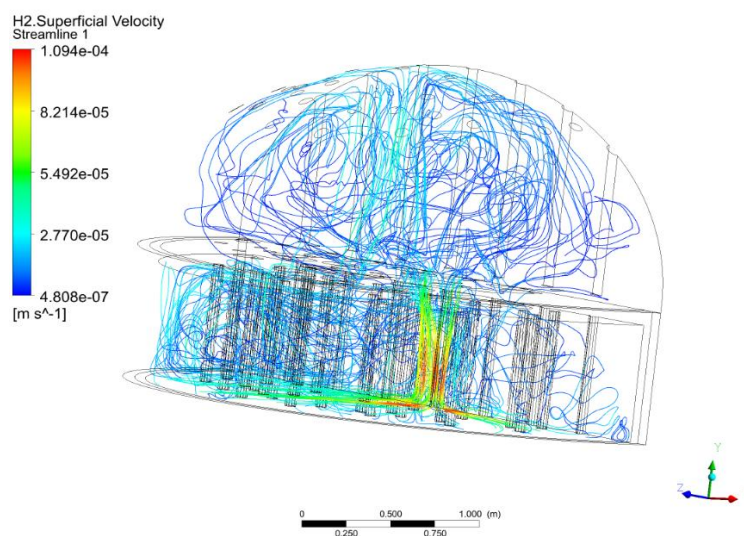


Рис. 4. Линии тока водорода

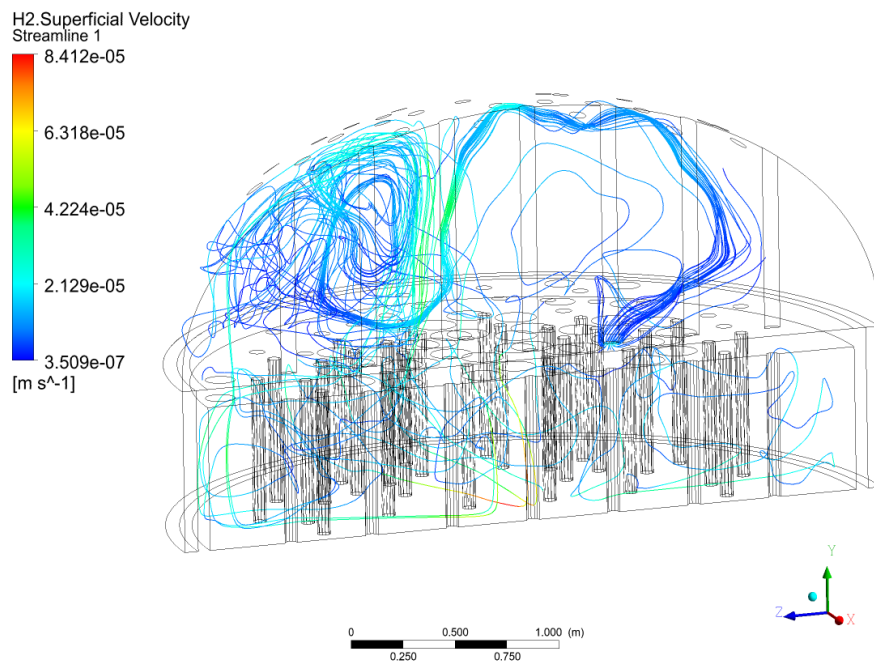


Рис. 5. Циркуляция водорода около одного из разгерметизированных отверстий СУЗ

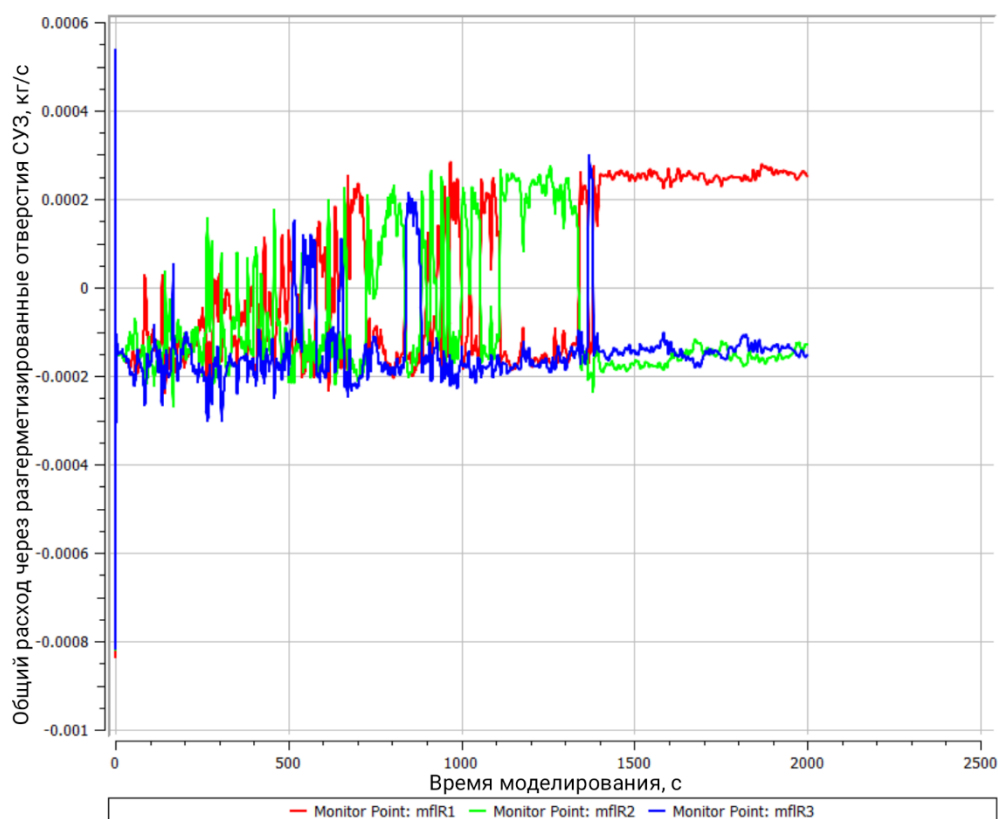


Рис. 6. Общий расход через разгерметизированные стержни СУЗ:
mflR1 – расход через центральное отверстие; *mflR2* – расход через отверстие левее
 центрального; *mflR3* – расход через отверстие правее центрального

О объемном содержании водорода можно судить по графику на рисунке 7. Ожидаемо, что в объеме между верхней и средней плитой БЗТ доля водорода будет больше. Далее он поднимется в объем под крышкой, но там его меньше, так как этот объем находится достаточно далеко от источника и из него водород покидает объем

через разгерметизированные СУЗы. Так как циркуляция в боковых объемах минимальна, то и водорода там весьма мало.

На рисунке 8 показан график содержания водорода в объемах с течением времени. С 500 секунды моделирования уже четко заметна тенденция роста его содержания. Если предположить, что далее эта тенденция будет соблюдаться, то можно рассчитать, к какому времени в объеме с наибольшим начальным содержанием водорода создастся его взрывоопасная концентрация. В данном случае это объем между плитами БЗТ. После экстраполяции полученных данных по методу наименьших квадратов было получено критическое значение доли водорода 4% через 254300 секунд или 70,64 часов, что составляет 2,9 суток. На основании данного значения можно делать вывод о необходимости продувки контура нейтральным газом (например, азотом) и частоты ее проведения.

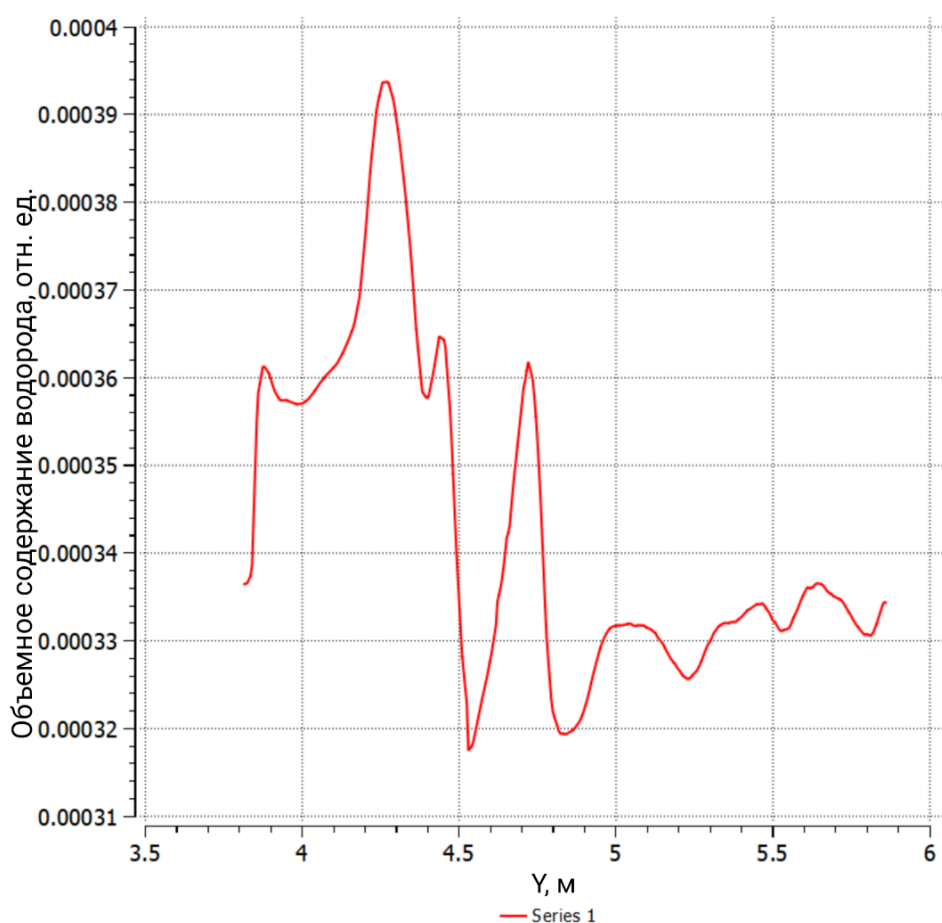


Рис. 7. Объемное содержание водорода по высоте модели

Через разгерметизированные отверстия СУЗ в объем поступает кислород. На рисунке 9 представлен график объемного содержания кислорода. Можно сделать вывод, что, поступая в объем, относительно холодный кислород опускается в объем между плитами БЗТ, где увлекается вниз нестационарными вихрями. Там он циркулирует вместе с потоком и может образовать при должной концентрации взрывоопасную смесь с водородом. Как известно из [1], в гремучей смеси на 2 моля водорода приходится 1 моль кислорода. То есть, если взрывоопасное объемное содержание водорода составляет 4 %, то взрывоопасное объемное содержание кислорода будет составлять 2 %. Из рисунка 10 видно, что максимальное содержание водорода наблюдается в объеме между плитами. Тогда по методу наименьших квадратов

критическая концентрация кислорода 2 % создается на 1289 секунде, то есть через 21,48 минут от начала расчета.

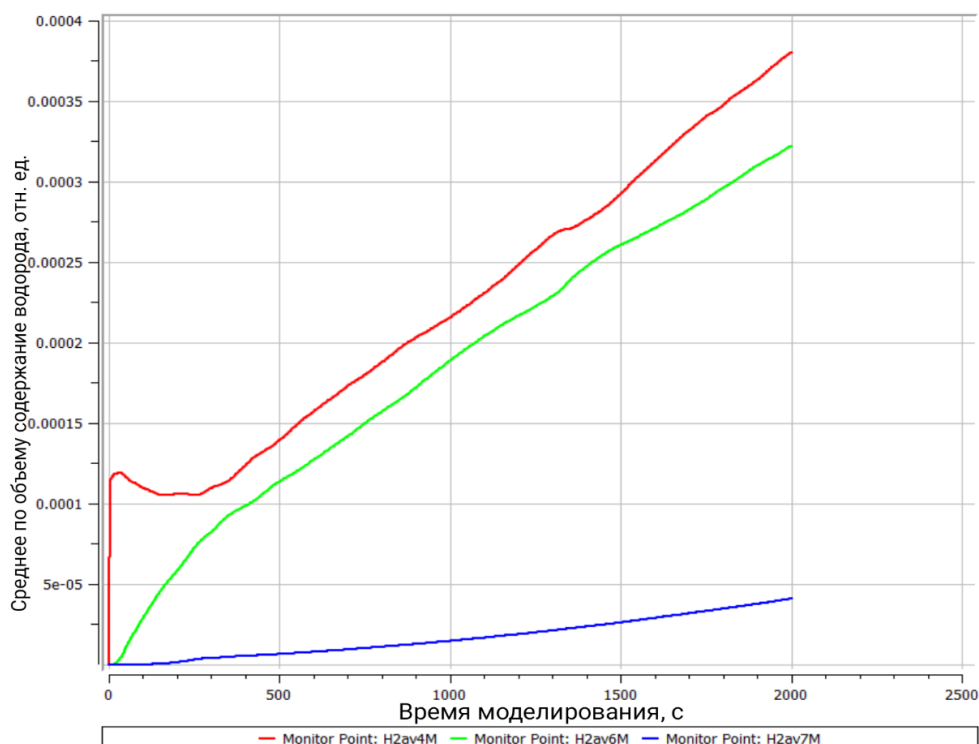


Рис. 8. Среднее объемное содержание водорода в зависимости от времени моделирования:
H2av4m – содержание водорода в 4 объеме; *H2av6m* – содержание водорода в 6 объеме;
H2av7m – содержание водорода в 7 объеме

Так как для создания гремучей смеси необходимо выполнение условий и по водороду, и по кислороду, значит, решающим временем будет время накопления водорода, на которое и стоит обратить наибольшее внимание при организации продувки.

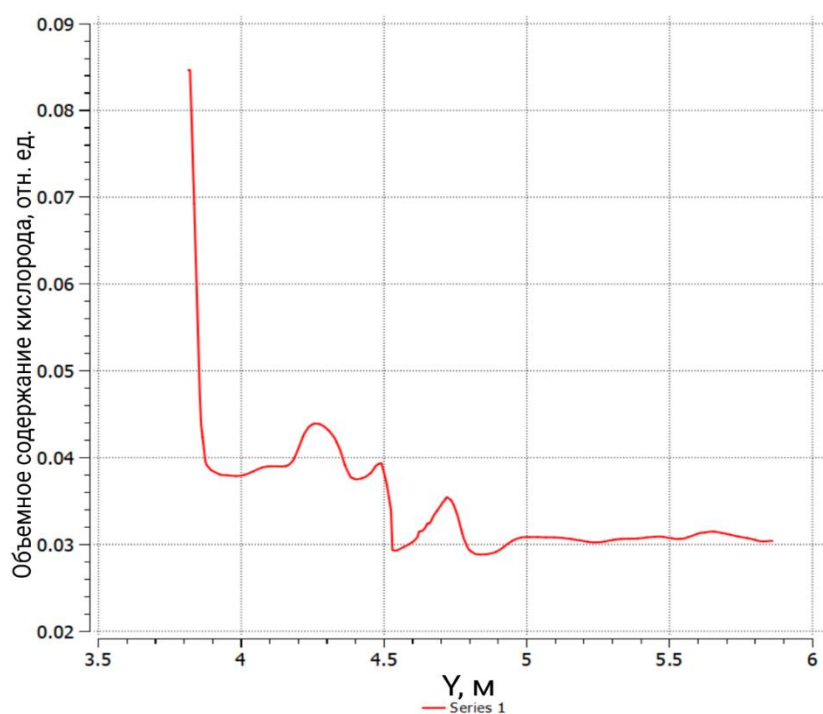


Рис. 9. Объемное содержание кислорода по высоте модели

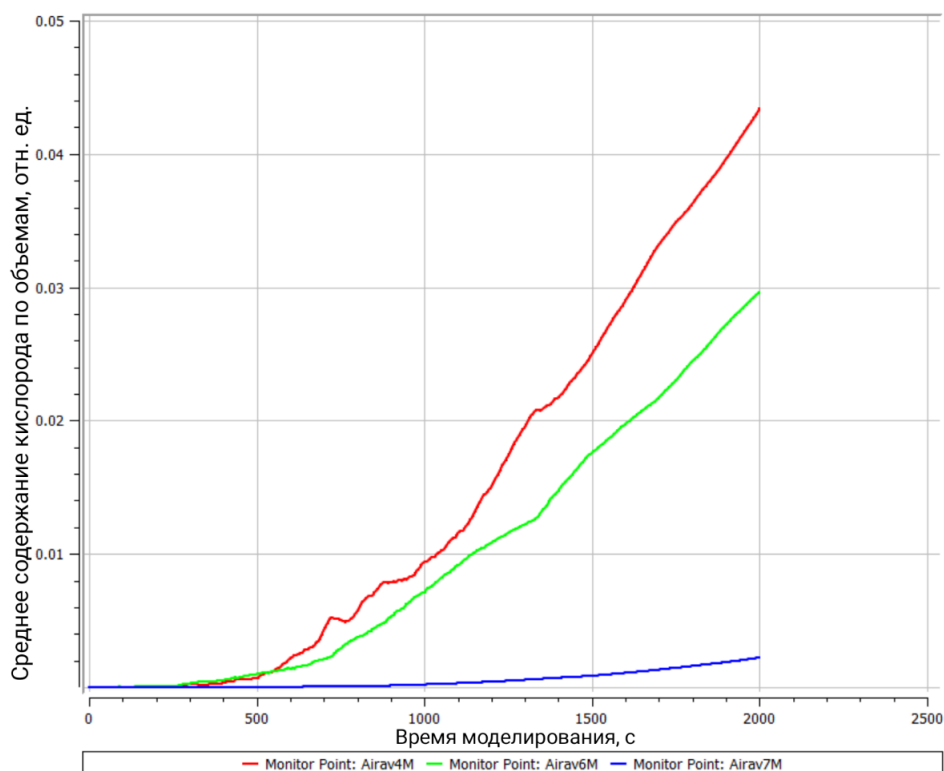


Рис. 10. Среднее объемное содержание кислорода в зависимости от времени моделирования:
 Airav4M – содержание водорода в объеме 4; Airav6M – содержание водорода в объеме 6;
 Airav7M – содержание водорода в объеме 7

4. Выводы по модели 1

Из рассмотренного выше анализа результатов видно, что из-за разности температур в модели образуется конвективная циркуляция на основе нестационарных вихрей. Тенденция покидания водорода объем, равно как и поступление в него кислорода, нестационарна. В объеме между средней и верхней плитой БЗТ накапливается как водород, так и кислород. По расчетам, через 70,6 часов после начала моделирования при поступлении водорода с расходом 10^{-7} кг/с в данном объеме создается критическая концентрация как водорода, так и кислорода, что без принятия мер по удалению газов из объема может привести к детонации.

5. Анализ результатов модели 2

О качестве моделирования пристеночного слоя позволяет судить параметр y^+ . Как и в случае предыдущей модели, здесь рассматривается высокорейнольдсовая модель, для которой y^+ должен лежать в диапазоне от 20 до 100. По результатам расчетов было получено, что диапазон максимальных значений y^+ от 61,1 до 63,1. Исходя из полученных значений можно сделать вывод, что приемлемая точность моделирования пристеночного слоя была получена.

Распределение линий тока представлено на рисунке 11. Как можно заметить, основные вихри сосредоточены в пространстве над уровнем воды и средней плитой БЗТ, а также в пространстве между средней и верхней плитами. Видно, что за счет конвекции поток поднимается в верхний объем под крышку реактора, охлаждается там, а затем через боковые объемы и отверстия в плитах БЗТ опускается вниз.

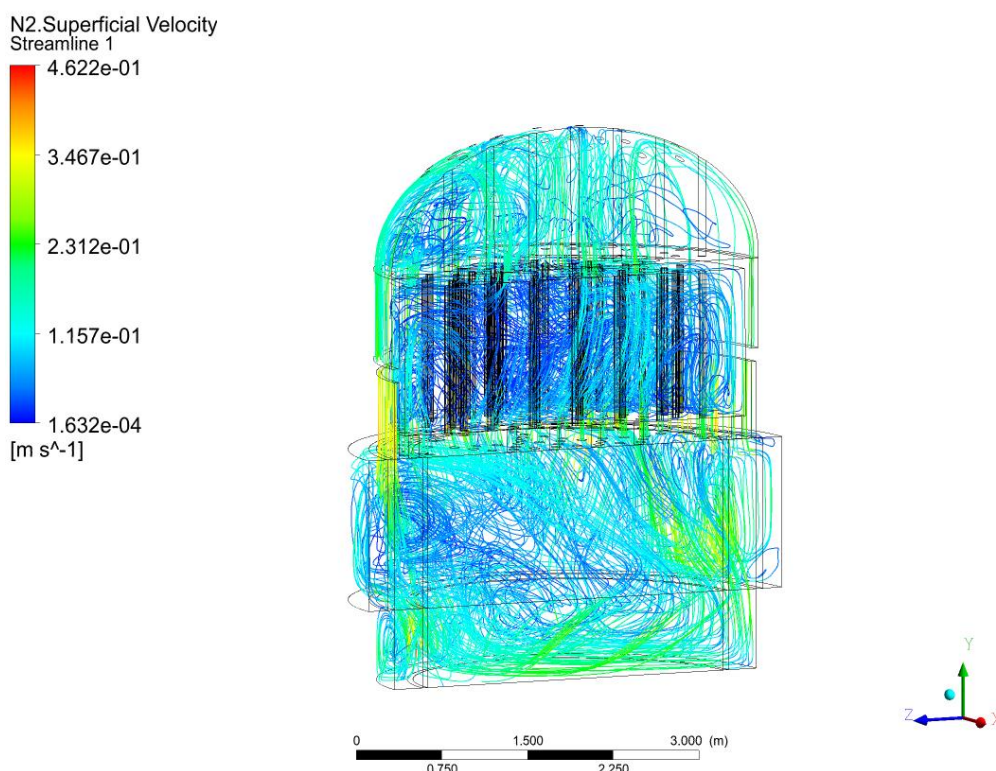


Рис. 11. Распределение по объему линий тока

Также было построено распределение скорости водорода в объеме и его линий тока (см. рис. 12 и 13). Можно заметить, что от поверхности воды, где генерируется водород, далее он поднимается вверх по объему с помощью вихрей (один особенно крупный можно наблюдать по правому боку модели на рисунке 13). Далее через отверстия в средней и верхней плитах БЗТ водород поднимается в объем под крышкой. Там он циркулирует в виде нестационарных вихрей и потом или спускается в нижние объемы, или покидает объем через разгерметизированные отверстия СУЗ. На рисунке 14 видно, как водород, прогреваясь, поднимается из нижних объемов в объем под крышкой реактора, где, увлекаемый одним из нестационарных вихрей, обтекает один из разгерметизированных отверстия СУЗ. В результате этого обтекания происходит подсос извне кислорода и азота.

Объемная концентрация водорода по высоте модели представлена на рисунке 15. Как можно заметить, максимум ее наблюдается в районе средней плиты БЗТ и составляет около $4,9 \cdot 10^{-5}$.

Также на рисунке 16 представлен график зависимости среднего объемного содержания водорода от времени моделирования. На графике от 150 секунды можно заметить четкую тенденцию роста содержания водорода для всех объемов. Если предположить, что далее эта тенденция будет соблюдаться, то можно рассчитать, к какому времени в объеме с наибольшим начальным содержанием водорода создастся его взрывоопасная концентрация. В данном случае это объем между нижней и средней плитой БЗТ. После экстраполяции полученных данных по методу наименьших квадратов было получено критическое значение доли водорода 4% через 446500 секунд или 124,03 часа, что составляет 5,17 суток. На основании данного значения можно делать вывод о необходимости продувки контура нейтральным газом (например, азотом) и частоты ее проведения.

H2.Superficial Velocity
Contour 1

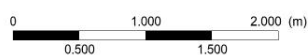
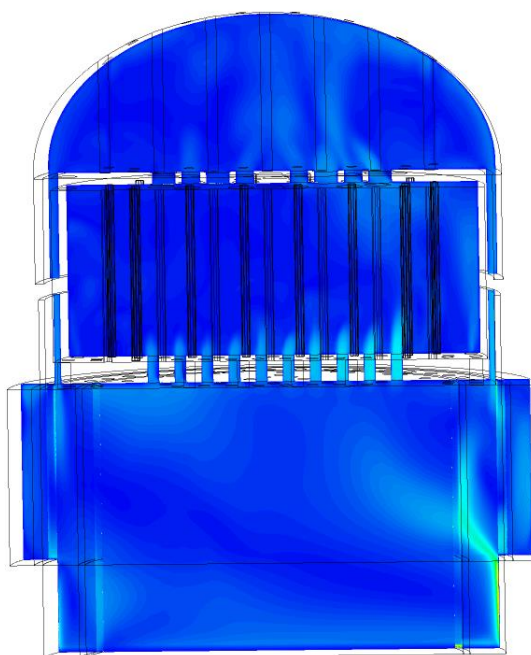
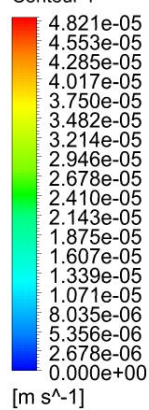


Рис. 12. Распределение скорости водорода по объему

H2.Superficial Velocity
Streamline 1

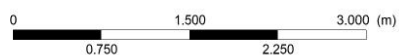
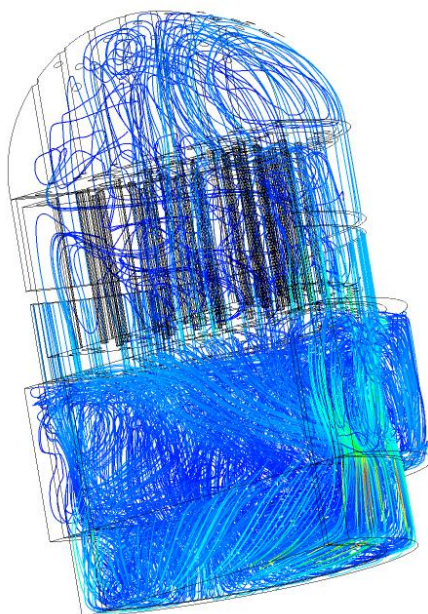
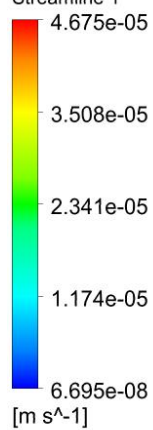


Рис. 13. Линии тока водорода в объеме

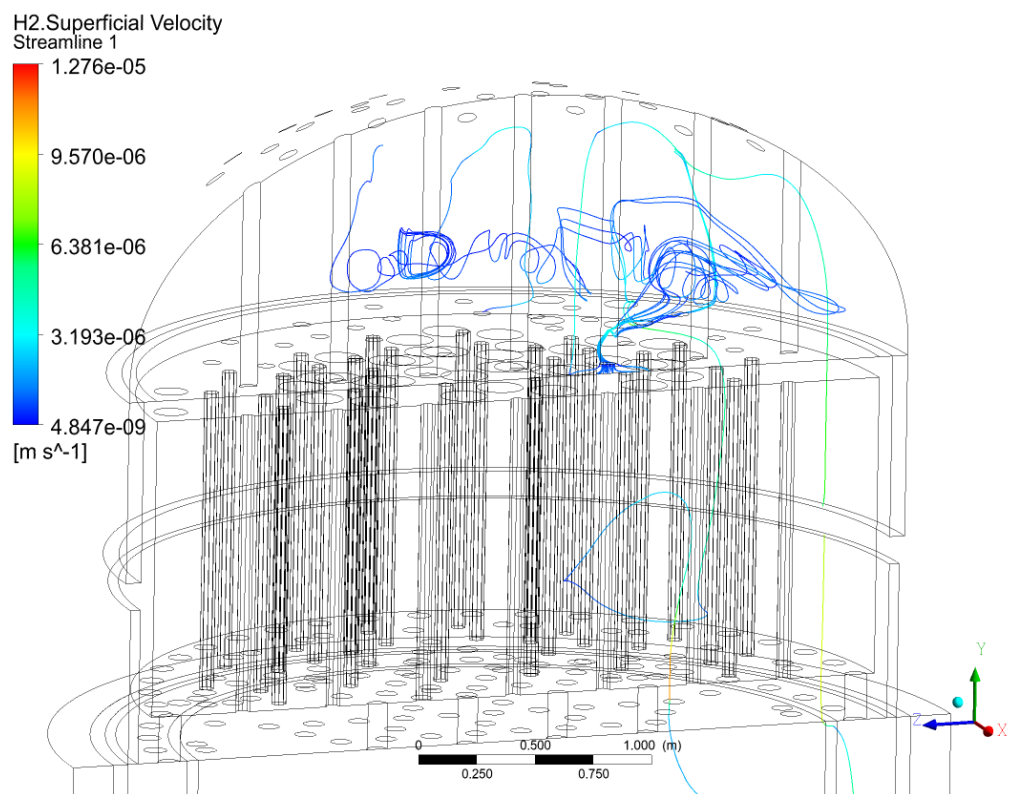


Рис. 14. Обтекание водородом одного из разгерметизированных стержней СУЗ

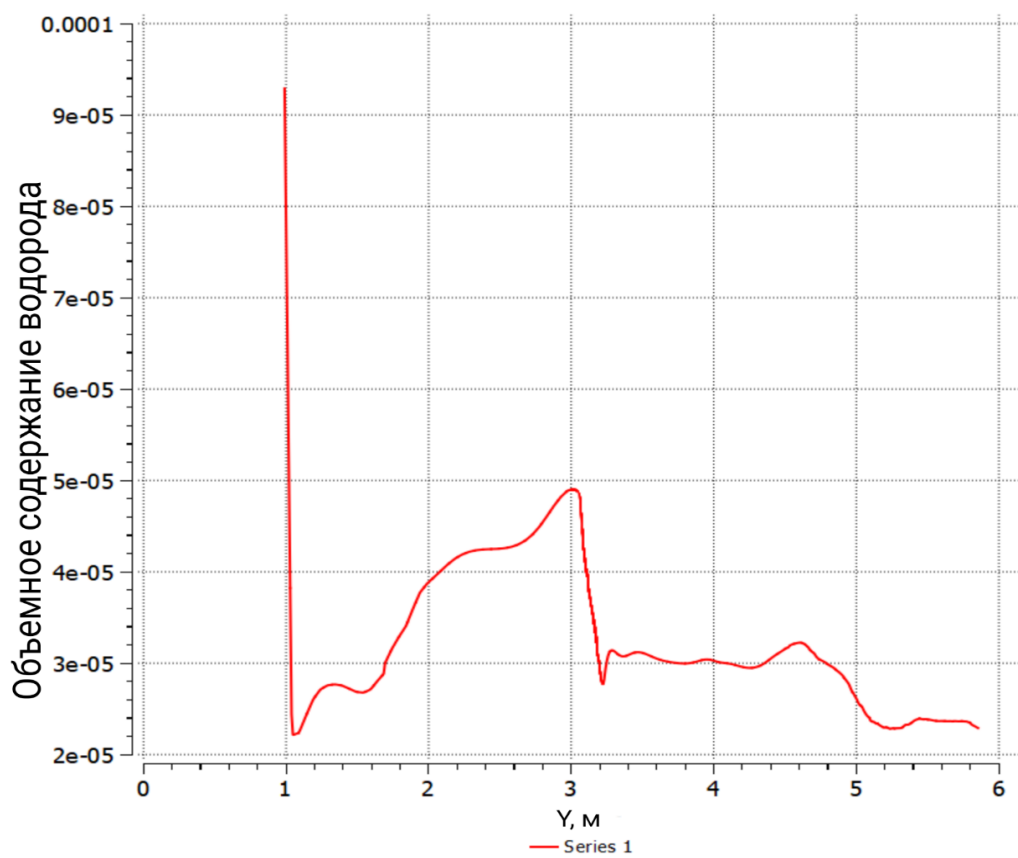


Рис. 15. Объемная доля водорода по высоте модели

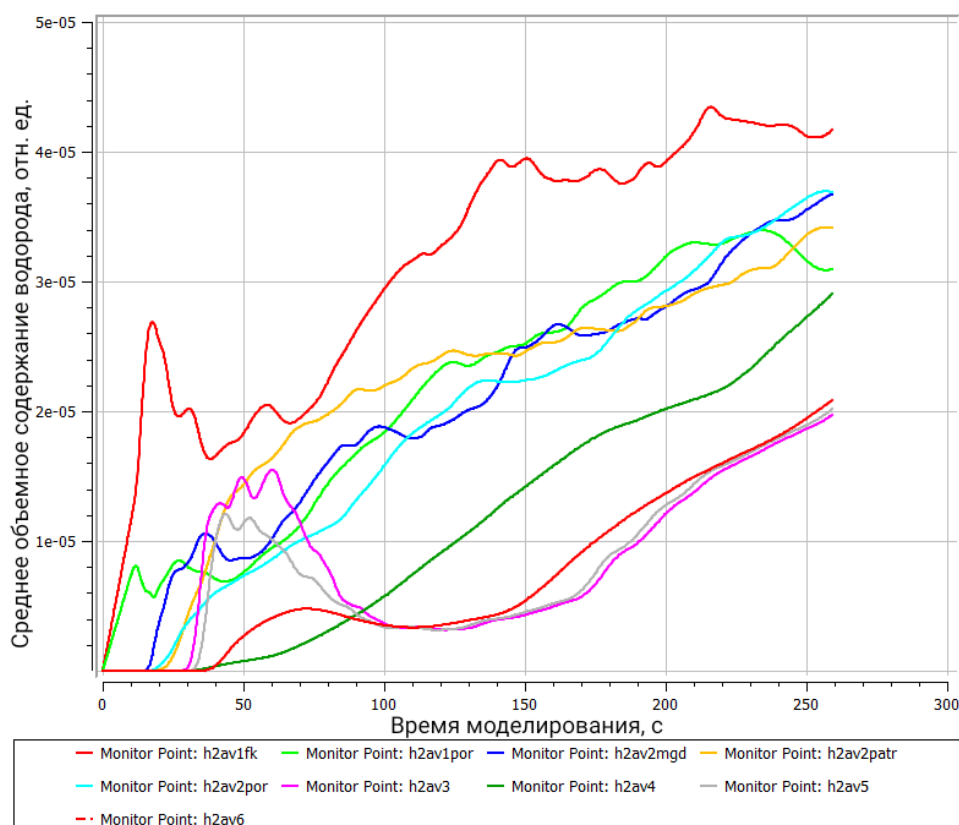


Рис. 16. График зависимости среднего объемного содержания водорода от времени моделирования:

h2av1fk – содержание водорода в объеме 1fk; h2av1por – содержание водорода в объеме 1por; h2av2mgd – содержание водорода в объеме 2mgd; h2av2patr – содержание водорода в объеме 2patr; h2av2por – содержание водорода в объеме 2por; h2av3 – содержание водорода в объеме 3; h2av4 – содержание водорода в объеме 4; h2av5 – содержание водорода в объеме 5; h2av6 – содержание водорода в объеме 6

Далее было рассмотрено распределение по объему поступающего из разгерметизированных СУЗов кислорода. Циркуляция его и поступление в объем представлены на рисунках 17 и 18. Как можно заметить, кислород поступает в объем, а затем он может пойти несколькими путями. Первый: из-за низкой температуры, кислород захватывается нисходящим потоком и опускается в нижние объемы, а там, прогреваясь, начинает циркулировать в вихрях потока. Второй: сразу от верхней плиты кислород захватывает восходящий вихрь, и начинается циркуляция в верхнем объеме.

Объемная доля кислорода представлена на рисунке 19. Видно, что максимальное ее значение достигается как раз под крышкой реактора в верхней плите БЗТ вблизи разгерметизированного СУЗа и у выходных патрубков и ведущих к ним боковых объемов, по которым и спускается кислород из верхних объемов.

График на рисунке 20 также подтверждает, что со временем после стабилизации процесса в объемах под крышкой реактора (v6) и боковых объемах (v3, v5), ведущих к околпатрубной области, создается наибольшая концентрация кислорода. Также можно заметить тенденцию после 150 секунды к росту содержания кислорода в остальных объемах. Однако это только начало процесса и устойчивой тенденции нет, так что при более длительном моделировании могут быть некоторые изменения.

Для создания гремучей смеси должно выполняться условие: на 2 моля водорода приходится 1 моль кислорода. То есть, если взрывоопасное объемное содержание водорода составляет 4%, то взрывоопасное объемное содержание кислорода будет составлять 2%. Из рисунка 20 видно, что максимальное содержание водорода

наблюдается в объеме под крышкой реактора. Тогда, оценивая по методу наименьших квадратов, критическая концентрация кислорода 2% создается на 2602 секунде, то есть через 43,37 минуты от начала расчета.

Так как для создания гремучей смеси необходимо выполнение условий и по водороду, и по кислороду, значит, решающим временем будет время накопления водорода, на которое и стоит обратить наибольшее внимание при организации продувки.

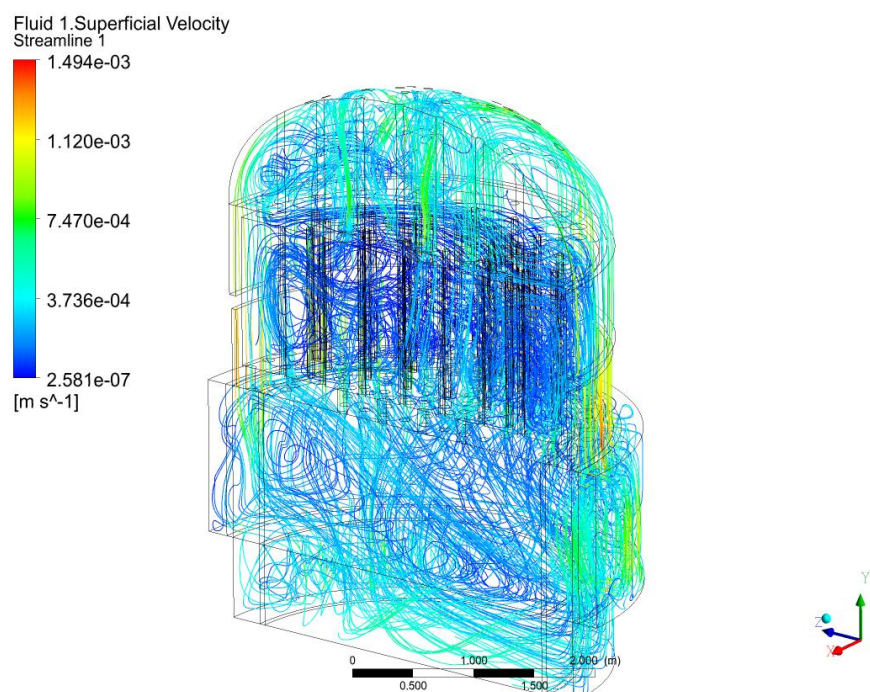


Рис. 17. Циркуляция в объемах кислорода

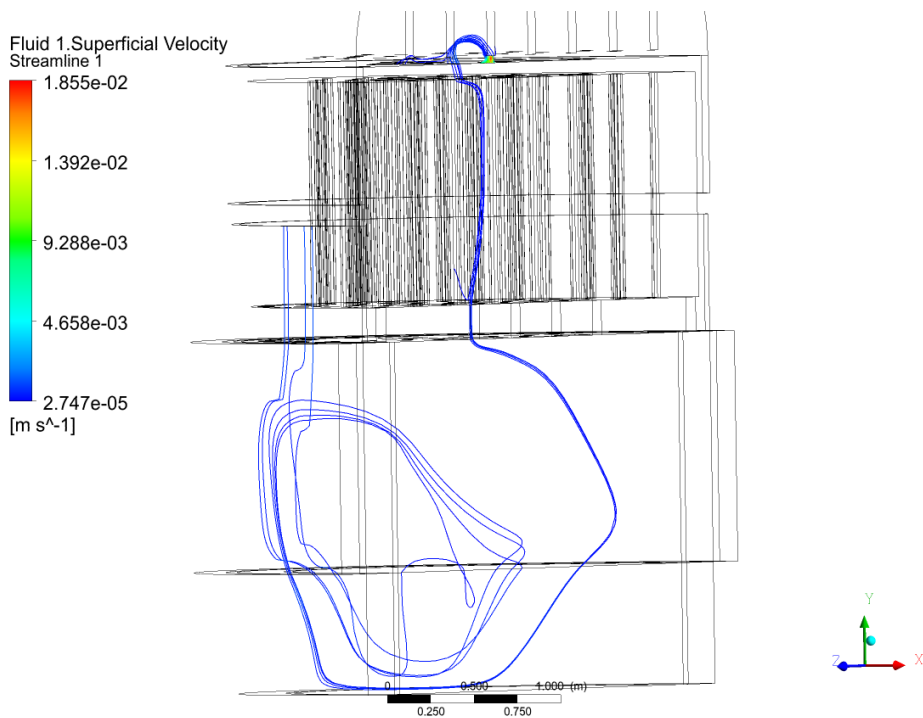
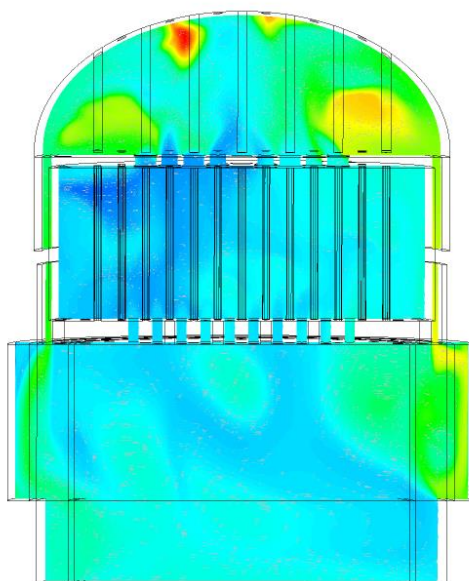


Рис. 18. Поступление в объем кислорода из разгерметизированного СУЗа

Fluid 1.Volume Fraction
Contour 1

5.032e-03
4.824e-03
4.616e-03
4.408e-03
4.200e-03
3.992e-03
3.784e-03
3.576e-03
3.368e-03
3.160e-03
2.952e-03
2.744e-03
2.536e-03
2.328e-03
2.120e-03
1.911e-03
1.703e-03
1.495e-03
1.287e-03



0 1.500 3.000 (m)
0.750 2.250

Рис. 19. Объемная доля кислорода

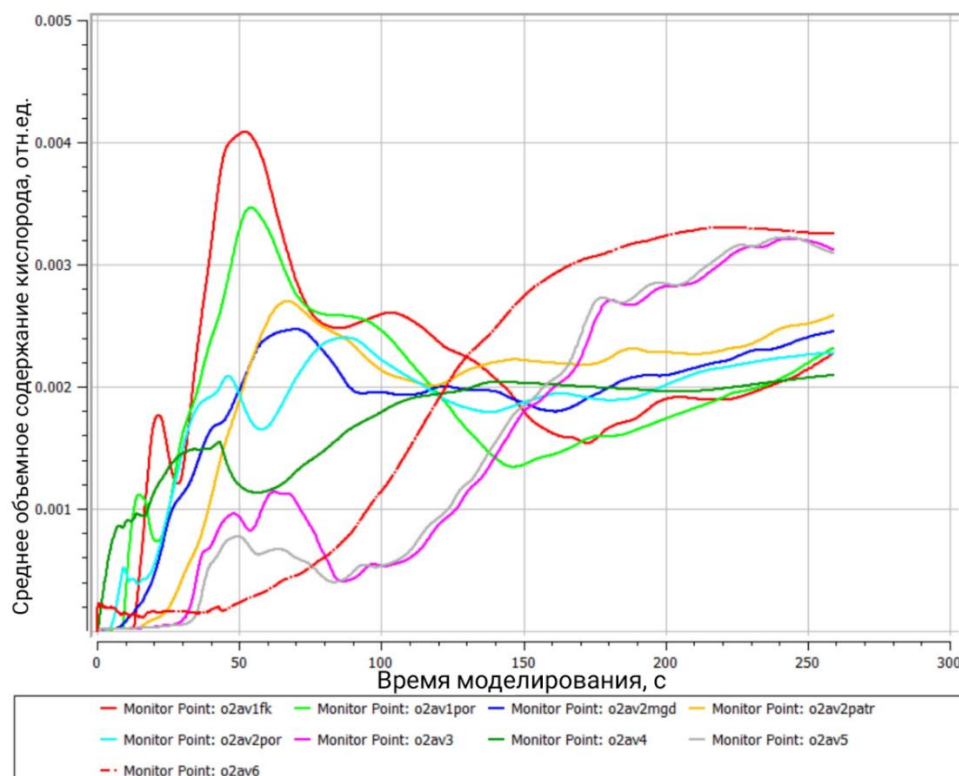


Рис. 20 – Средняя доля кислорода в объемах в зависимости от времени моделирования:
o2av1fk – содержание кислорода в объеме 1fk; o2av1por – содержание кислорода в объеме 1por;
o2av2mgd – содержание кислорода в объеме 2mgd; o2av2patr – содержание кислорода в объеме 2patr;
o2av2por – содержание кислорода в объеме 2por; o2av3 – содержание кислорода в объеме 3;
o2av4 – содержание кислорода в объеме 4; o2av5 – содержание кислорода в объеме 5; o2av6 – содержание кислорода в объеме 6

Также был получен график общего расхода через разгерметизированные СУЗы в зависимости от времени моделирования (см. рис. 21). Как можно заметить, расход наблюдается отрицательный и положительный, что значит: при положительном расходе – поступление в объем кислорода, при отрицательном – уход из объема водорода. Также можно заметить, что фазы поступления в объем и ухода из него газа через отверстия сменяют друг друга. Это связано с нестационарными вихрями и конвективными потоками, наблюдающимися в верхнем объеме.

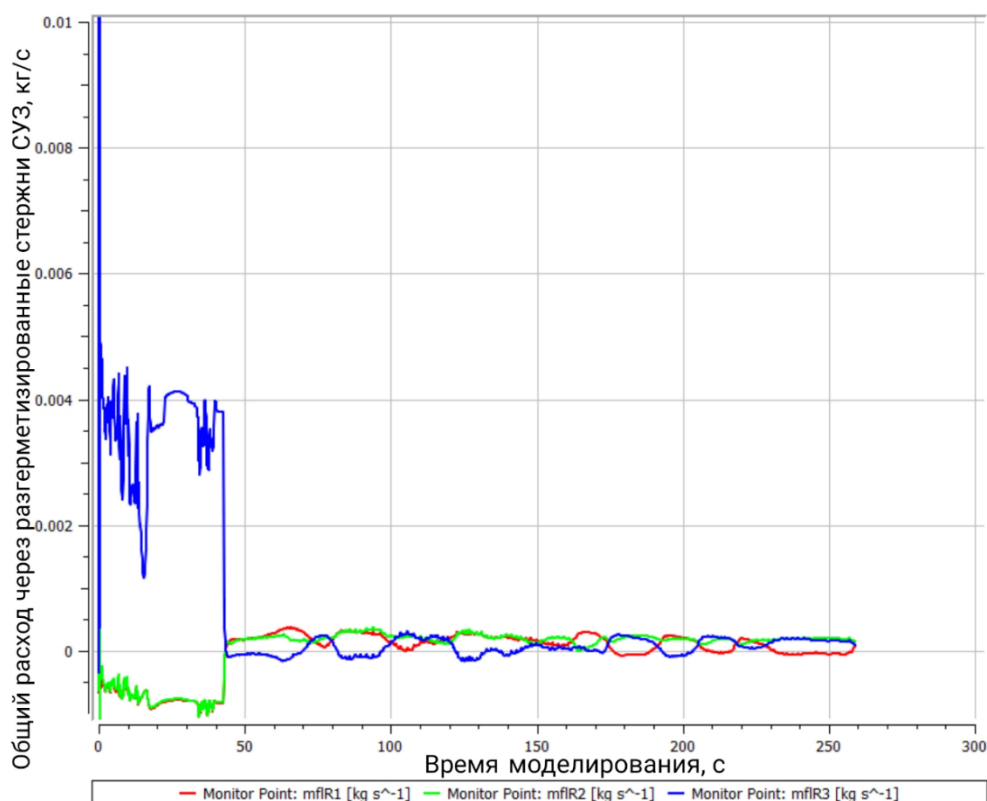


Рис. 21. График расхода через разгерметизированные стержни СУЗ от времени моделирования:

mflR1 – расход через центральное отверстие; *mflR2* – расход через отверстие левее центрального; *mflR3* – расход через отверстие правее центрального

6. Выводы по модели 2

Из вышеприведенных результатов следует, что в объемах преобладают нестационарные вихри и конвективное движение. Основная часть водорода накапливается у средней плиты БЗТ и в объеме, где он выходит с поверхности воды. Основная часть поступающего кислорода накапливается у верхней плиты БЗТ, а также в боковых объемах, ведущих к зоне патрубков. При этом критическое содержание с опасностью детонации гремучей смеси в объеме создается через 124,03 часа. Исходя из этих данных следует рассчитывать частоту продувки объемов нейтральными газами. Полученные результаты являются предварительными и нуждаются в дальнейшем более подробном моделировании на протяжении большего времени моделирования.

Заключение

Анализ расчета первой модели показал, что при уровне воды в районе верхней плиты БЗТ и поступления с ее поверхности водорода с расходом 10^{-7} кг/с при стоячном режиме в результате образования нестационарных вихрей, конвекции и нестационарного расхода через разгерметизированные отверстия СУЗ накопление водорода и кислорода

происходит в объеме между средней и верхней плитой БЗТ. По полученной зависимости накопления водорода и кислорода во времени было получено время достижения критического содержания гремучей смеси, которая может привести к взрыву – 70,64 часа.

Анализ расчета второй модели показал, что при уровне воды между входными и выходными патрубками и поступления с ее поверхности водорода с расходом 10^{-7} кг/с при режиме расхолаживания вследствие образования конвективных нестационарных вихрей и поступления-ухода через разгерметизированные отверстия СУЗ кислорода и водорода соответственно накопление водорода и кислорода происходит в районах средней и верхней плит БЗТ, а также в области у выходных патрубков. По полученной зависимости накопления водорода и кислорода от времени было получено время достижения критического содержания для создания гремучей смеси, которая может сдетонировать – 124,03 часа.

На основе полученных данных накопления водорода и кислорода в дальнейшем можно прогнозировать мероприятия по удалению газов из объемов путем продувки нейтральными газами.

Список литературы

- 1) С.А. Кабакчи, «Математическое моделирование радиационного воздействия на водные теплоносители ядерных энергетических установок», НИЦ «Курчатовский институт», 2018, 111 с.
- 2) А.С. Кравчук «Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач в пяти частях», Минск, 2013 год, часть 3, с. 56-76.
- 3) Отчет по анализу безопасности 43–923.203.007.БД.02. Хмельницкая АЭС, энергоблок 2. База данных по ЯППУ. Часть 2. Основные компоненты РУ. ОАО «Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «ЭНЕРГОПРОЕКТ», 186 с.