

газоудаления неконденсируемой смеси. Расчетные и экспериментальные работы показали, что действия по удалению неконденсируемой смеси не относятся к числу срочных мер, а предложенные две схемы аварийного газоудаления обеспечивают сдвиг неконденсирующихся газов из холодных коллекторов парогенераторов даже при консервативно заданной сдвиге. Для оптимизации характеристик и выбора окончательной схемы запланировано экспериментальное исследование совместной работы системы пассивного отвода тепла с парогенератором, конденсирующим парогазовую смесь. Исследования будут проводиться на крупномасштабном стенде ГЕ-2М, который создан в ФЭИ для комплексного изучения функциональной работоспособности и взаимодействия пассивных систем безопасности, применяемых в проектах АЭС с ВВЭР нового поколения. Приведенная в статье методика исследований на стенде ГЕ-2М позволит выбрать оптимальные способы сдвига неконденсирующихся газов из трубчатки парогенератора, уточнить ее расходную характеристику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович В.М., Малышев А.Б., Таранов Г.С. и др. Влияние пассивных систем АЭС нового поколения на обеспечение локализирующих функций контайнмента. — Труды АЭП, 2002, вып. 3, с. 3—14.
2. Ефанов А.Д., Драгунов Ю.Г., Беркович В.М. и др. Крупномасштабный полнотемпературный гидравлический стенд ГЕ-2М для исследований совместной работы пассивных систем безопасности в реакторной установке ВВЭР-1000. — В сб.: 3-я научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, ОКБ «Гидропресс», 2003, т. 5, с. 90—93.

Поступила в Редакцию 21.01.06

УДК 621.039.577+541.15

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРВОГО КОНТУРА ЯЭУ С ДВУХФАЗНЫМ ВОДНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

*Лукашенко М.Л., Буланов А.В., Верховская А.О., Воробьев Ю.Б.,
Карнаухов В.Е., Степанов О.Е. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),
Пена В.Н. (НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея),
Кабакчи С.А. (НИФХИ им. Л.Я. Карпова)*

Создание инновационных ЯЭУ с двухфазным теплоносителем связано с разработкой моделей, методов и программ для обоснования водно-химических режимов с заданными параметрами. Для этого необходимо описать:

влияние топологии и неконденсирующихся газов на межфазный массоперенос и транспортировку компонентов теплоносителя по первому контуру ЯЭУ;

радиационно-химические превращения водного теплоносителя первого контура с учетом состава реакторного излучения и теплофизических характеристик жидкой и паровой фаз;

пограничные процессы в системе водный теплоноситель—конструкционный материал первого контура при заданных радиационных, теплофизических и гидродинамических условиях в контуре, составе теплоносителя и свойствах материалов.

Моделирование химических превращений, происходящих с растворенными в воде веществами под действием быстрых нейтронов, γ -квантов и заряженных частиц, базируется на общепринятой в настоящее время теории косвенного воздействия излучения [1]. Для описания кинетики химических превращений компонентов раствора под действием излучения в ней используют систему дифференциальных уравнений, коэффициентами которой являются константы скорости и энергии активации элементарных реакций, первичный выход продуктов радиолиза воды, линейная передача энергии, мощность поглощенной дозы и температура среды.

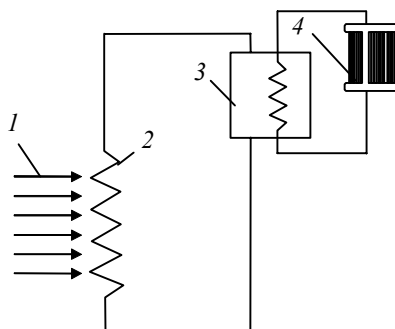
Такая традиционная интегральная модель в настоящее время используется для описания терморadiационно-химических процессов в первых контурах энергетических реакторов и исследовательских стендов с однофазным теплоносителем [2—5]. Однако применение традиционного подхода к описанию процессов в такой сложной системе, как первый контур ЯЭУ, не является оптимальным. Одновременный учет физико-химических и массообменных процессов в физическом элементе объема контура приводит к существенному усложнению модели и появлению неопределенностей, связанных с неуверенностью в адекватности использования констант скорости и энергии активации элементарных реакций, а также первичного выхода продуктов радиолиза воды, которые, как правило, определяли при исследовании простых идеализированных систем.

В настоящей статье предложен подход к моделированию водно-химического режима для переходных и стационарных режимов работы ЯЭУ, базирующийся на философии конструктора. Первый контур ЯЭУ разбивается на стандартные узлы, взаимодействие между которыми определяется существом решаемой задачи и особенностями конструкции реактора. Узлами могут быть как конструктивные элементы контура (активная зона или ее компоненты, компенсатор объема, трубопроводы и др.), так и элементы теплоносителя (жидкая и паровая фаза, пограничная область теплоноситель—конструкционный материал и др.). В каждом узле моделируют термохимические и радиационно-химические превращения компонентов водного теплоносителя. Вклад каждого компонента в узле учитывается суммированием соответствующего массового потока, взаимодействие процессов в узлах будет выражаться в перетоке компонентов между ними. При таком подходе к моделированию можно использовать режимы массопереноса, разработанные для конкретных ЯЭУ и ставящие модель в соответствие с реализованным теплогидравлическим режимом.

По нашему мнению, преимущество предлагаемого подхода состоит в том, что он позволяет под конкретную задачу конструировать не только модель первого контура ЯЭУ, но и отдельного элемента оборудования и области теплоносителя, в которых происходят терморadiационно-химические и массообменные процессы. Проиллюстрируем этот подход на примере водно-химического режима пассивной системы безопасности первого контура ЯЭУ.

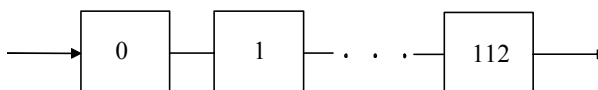
В силу своего функционального назначения пассивная система безопасности за счет естественной циркуляции теплоносителя и саморегулируемого водно-химического режима должна оставаться работоспособной в течение продолжительного времени без вмешательства извне при отключенной электроэнергии. Для существующих конструкций кипящих реакторов задача организации саморегулируемого водно-химического режима на сегодняшний день не решена. При некорректи-

руемом водно-химическом режиме в контуре возникает значительное количество кислорода и водорода при введении корректирующих добавок (газообразного водорода или раствора аммиака) для подавления радиолитического разложения, существенно повышается содержание водорода в паре на выходе из активной зоны реактора. Пассивная система безопасности представляет собой замкнутый контур с естественной циркуляцией теплоносителя, в котором отсутствует компенсатор давления в традиционном его понимании — в виде выделенного объема (рис. 1). Теплосъем осуществляется с части трубки парогенератора, далее теплоноситель поступает в теплообменник, где конденсируется пар и охлаждается теплоноситель, после чего он возвращается на вход трубки парогенератора. При движении через нее теплоноситель попадает в поле нейтронного и γ -излучения, что приводит к образованию радиолитических водорода и кислорода. Помимо радиационно-химических в контуре протекают и коррозионные процессы с образованием молекулярного водорода. В условиях замкнутого контура без сдувок неконденсирующиеся газы — водород и кислород накапливаются в теплоносителе. Это может нарушить нормальное функционирование установки, в частности, из-за снижения эффективности работы конденсатора, следствием чего может оказаться нарушение циркуляции теплоносителя.



Р и с. 1. Принципиальная схема пассивной системы безопасности: 1 — источник излучения; 2 — трубка; 3 — аммиачный теплообменник; 4 — теплообменник для передачи тепла охлаждающей среде

Нодализационная схема, соответствующая участку трубки пассивной системы безопасности, показана на рис. 2. Узлами в ней являются жидкая и парогазовая фазы теплоносителя. Рассмотрим их взаимодействие.



Р и с. 2. Нодализационная схема трубки

Жидкая фаза. Скорость изменения количества продукта в жидкой фазе теплоносителя рассматриваемого объема складывается из потока продукта X , поступающего с теплоносителем $P_f[X]_1$ и образующегося (расходуемого) в результате радиолитических процессов $P_f[X]_2$, за вычетом уносимого (поступающего) через межфазную поверхность потока $P_f[X]_3$ и удаляемого из объема вместе с теплоносителем $P_f[X]_4$:

$$K_f^*[X] = P_f[X]_1 + P_f[X]_2 - P_f[X]_3 - P_f[X]_4.$$

Потоки $P_f[X]_1$ и $P_f[X]_4$ определяются расходом теплоносителя и текущей концентрацией продукта, поток $P_f[X]_3$ рассчитывается по соотношению

$$P_f[X]_3 = \beta_x S [\rho_x - (\rho_x)_s],$$

где β_x — коэффициент массоотдачи, м/с; S — площадь поверхности раздела фаз, м²; $(\rho_x)_s$, ρ_x — плотность продукта на границе раздела фаз и в объеме жидкой фазы, кг/м³.

Плотность ρ_x связана с концентрацией продукта $C[X]$ соотношением

$$\rho_{H_2} = k_x \rho_w C[X],$$

где k_x — коэффициент перехода от мольной к массовой концентрации для вещества X , моль/кг; ρ_w — плотность воды, кг/м³.

Для оценки перехода газов в парогазовую фазу необходимо определить верхнюю границу скорости их образования и поступления в паровую фазу через межфазную поверхность. Рассмотрим потоки $P_f[X]_3$ и $P_f[X]_2$ для молекулярных водорода, кислорода и пероксида водорода.

Поток $P_f[X]_3$. Для радиолитических газов — водорода и кислорода положим плотность на поверхности раздела тождественно равной нулю: $(\rho_x)_s \equiv 0$. Тем самым поток рассматривается как максимально возможный. Это не противоречит физической картине, поскольку межфазный массоперенос протекает на фоне интенсивного парообразования. Для пероксида водорода плотность на поверхности раздела фаз $(\rho_x)_s$ примем равной его плотности в паровой фазе, т.е. будем считать, что коэффициент распределения для этого продукта равен единице.

Поток $P_f[X]_2$. Пусть $(\rho_x)_c$ — плотность, соответствующая стационарной концентрации радиолитических газов и пероксида водорода в жидкой фазе при отсутствии паровой фазы. Рассмотрим два случая.

1. $(\rho_x) \geq (\rho_x)_c$. Для радиолитических газов примем, что $P_f[X]_2 = 0$. С введением такого предположения скорость рекомбинации кислорода и водорода в жидкой фазе занижается, поскольку при указанных условиях данный поток должен быть меньше нуля. Для пероксида водорода примем модель, которая учитывает вклад первичного выхода, а также его разложение и образование в радиационно-химических реакциях:

$$P_f[X]_2 = (A_x I G_x - K_x C[X]) mf,$$

где A_x — коэффициент размерности, 100 эВ·моль/(мол·Вт·кг·с); I — мощность поглощенной дозы, Вт; G_x — первичный выход; mf — количество жидкой фазы, кг; K_x — наблюдаемый коэффициент разложения, рассчитываемый по уравнению

$$A_x I G_x - K_x C[X]_0 = 0.$$

Здесь $C[X]_0$ — стационарная концентрация пероксида водорода для заданных температуры и мощности поглощенной дозы, моль/кг.

2. $(\rho_x) < (\rho_x)_c$. В этом случае используем консервативный подход и считаем, что скорость образования молекулярного водорода определяется его первичным радиационно-химическим выходом и мощностью поглощенной дозы. Скорость образования кислорода и пероксида водорода будем рассчитывать по материальному балансу радиолиза воды.

Определенный таким образом поток $P_f[X]_2$ имеет максимальную скорость образования радиолитических газов. Для их количественной оценки необходимо знание стационарной концентрации водорода, пероксида водорода и кислорода при радиолизе однофазного водного теплоносителя в условиях системы пассивной безопасности. Ее рассчитывали с помощью блока H2Orad кода МОРАВА H2 [5].

Паровая фаза. Скорость изменения количества продукта в паровой фазе теплоносителя рассматриваемого объема

$$K_b[X] = P_b[X]_1 + P_b[X]_2 + P_b[X]_3 - P_b[X]_4,$$

где $P_b[X]_{1-4}$ — поток продукта, поступающего с теплоносителем, образующегося (расходуемого) в результате радиолитических процессов, уносимого (поступающего) через межфазную поверхность, удаляемого из объема вместе с теплоносителем соответственно, кг/с. Потоки $P_b[X]_1$, $P_b[X]_4$ определяются расходом фазы теплоносителя и текущей концентрацией продукта. Принимаем, что поток $P_b[X]_3$ через межфазную поверхность равен соответствующему потоку жидкой фазы, в паровой фазе не происходит радиационно-химических преобразований стабильных продуктов, т.е. $P_b[X]_2 = 0$.

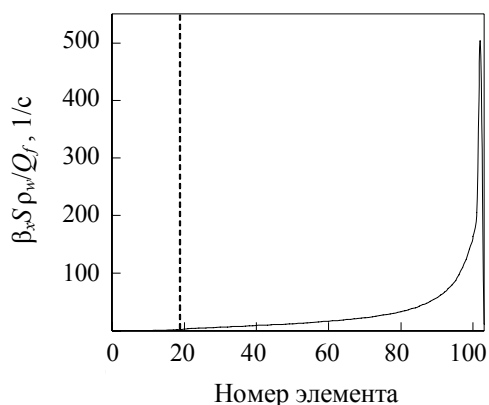
Расчет кинетики водно-химических процессов базировался на теплогидродинамических характеристиках, получаемых при моделировании работы контура с помощью кода улучшенной оценки RELAP5. Влияние режима течения на межфазный массоперенос учитывали с помощью соотношения, характеризующего интенсивность массоотдачи:

$$N = \beta_x S \rho_w / Q_f$$

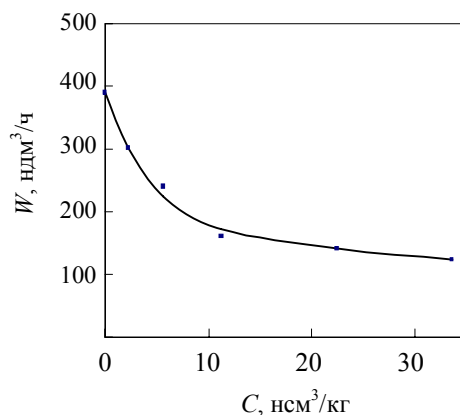
где β_x — коэффициент массоотдачи, м/с; S — площадь поверхности раздела фаз, м²; ρ_w — плотность воды, кг/м³; Q_f — количество жидкой фазы, кг (рис. 3). Эти параметры определяли по гидродинамическим характеристикам режима течения в элементах нодализационной схемы пассивной системы безопасности (см. рис. 2).

С использованием разработанной методики изучено влияние избытка водорода в теплоносителе на входе в трубчатку на скорость образования радиолитических газов. Источником избытка водорода могут быть начальная дозировка водорода либо аммиака в теплоноситель и коррозионные процессы. Результаты расчетного эксперимента свидетельствуют, что при увеличении избытка водорода снижается скорость образования радиолитических газов в жидкой фазе теплоносителя в трубчатке (рис. 4). Это обусловлено тем, что избыточный водород выделяется в парогазовую фазу постепенно по мере движения теплоносителя по трубчатке, а не мгновенно. Избыток водорода в жидкой фазе активизирует процессы рекомбинации, в результате чего скорость образования радиолитических газов снижается до нуля.

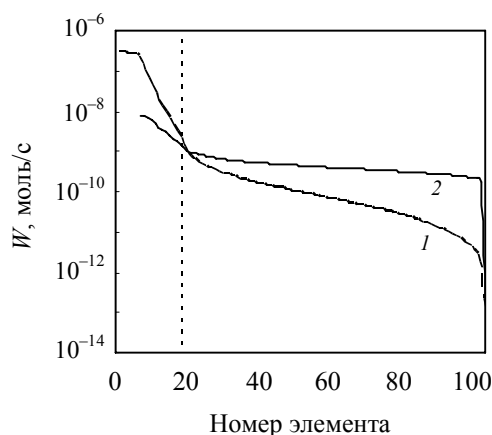
Обращает на себя внимание изменение наклона кривой при превышении избытка водорода 10 нсм³/кг. Объяснение этого может быть получено при сравнении кривых 1, 2 на рис. 5. Кривая 1 рассчитана



Р и с. 3. Зависимость интенсивности массоотдачи от номера элемента трубчатки: --- — граница перехода от пузырькового к кольцевому режиму течения



Р и с. 4. Зависимость скорости образования радиолитического водорода в жидкой фазе от концентрации водорода в теплоносителе на входе в трубчатку



Р и с. 5. Скорость образования радиолитического водорода в первичных процессах и его перехода через межфазную границу для стационарной концентрации, рассчитанной для однофазного теплоносителя с помощью традиционной (1) и предлагаемой методики (2) по элементам трубки: - - - — граница перехода от пузырькового к кольцевому режиму течения

через межфазную поверхность. Сравнение кривых 1, 2 показывает, что для пузырькового режима скорость накопления водорода в парогазовой фазе лимитируется его передачей через межфазную поверхность, в дальнейшем скоростью образования в жидкой фазе. Соответственно скорость образования водорода, рассчитанная для рассматриваемого контура по традиционной консервативной методике, завышена в 3 раза по сравнению с предлагаемой. Обращает на себя внимание значительная разница скорости выхода водорода, рассчитанная по двум методикам при кольцевом режиме кипения (номер элементов нодализационной схемы 0—20). Высокая интенсивность массоотдачи для этого режима приводит к эффективному выносу из жидкой фазы водорода, избыток которого служит для подавления радиолитического процесса. Этим объясняется изменение наклона кривой на рис. 4 при концентрации водорода выше 10 нсм³/кг. Разница между кривыми 1 и 2 позволяет также судить о концентрации водорода в жидкой фазе при кольцевом режиме: она оказывается в десятки раз ниже стационарной концентрации, рассчитанной для однофазного теплоносителя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Проект № 05-02-16178.

по предлагаемой методике умножением коэффициента, характеризующего массоотдачу, на количество жидкой фазы в рассматриваемом объеме и стационарную концентрацию водорода, рассчитанную для однофазного теплоносителя. Кривая 2 получена на основе классического консервативного подхода, использующего для оценки максимальной скорости накопления водорода выражение

$$W(\text{H}_2)_{\text{макс}} = G_{\text{H}_2} I M_{\text{H}_2\text{O}},$$

где $G_{\text{H}_2} = 0,45$ мол./100 эВ — первичный выход водорода при радиолитическом разложении воды; I — мощность поглощенной дозы, Вт; $M_{\text{H}_2\text{O}}$ — количество жидкой фазы в каждом элементе нодализационной схемы, кг.

Накопление газов в паровой фазе может быть ограничено скоростью как их образования в жидкой фазе, так и передачи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бяков В.М., Ничипоров Ф.Г.** Радиолитический процесс в ядерных реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 176 с.
2. **Lundgren K., Christensen H.** Model calculations of water radiolysis in the primary coolant circuit of the Barseback-1 BWR. — In: Proc. 7th BNES Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems. Bournemouth, UK, 1996, v. 1, p. 214—221.
3. **Satoh T., Satoh Y., Uchida S.** Water chemistry in a crack tip under irradiation, evaluation of oxidant concentration in the crack tip. — J. Nucl. Sci. Technol., 2003, v. 40, № 5, p. 334—342.

4. Garbett K., Henshaw J., Sims H. Hydrogen and oxygen behaviour in PWR primary coolant. — In: Proc. 8th BNES Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems. Bornemouth, UK, 2000, v. 1, p. 85—92.
5. Архипов О.П., Бугаенко В.Л., Кабакчи С.А. МОРАВА-Н2 (МОщность-Расхолаживание-АВАрия-молекулярный водород). Расчет образования и распределения водорода и других газов в оборудовании 1 контура реакторных установок типа ВВЭР в проектных режимах, включая аварийные. Программа для ПЭВМ № 00469-ОФАП-ЯР, РНЦ «Курчатовский институт», 2001.

Поступила в Редакцию 14.11.05

УДК 621.039.577

СРЕДСТВА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ В ФОРМИРОВАНИИ КОНСТРУКТИВНОГО ОБЛИКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ЯЭУ

*Еремин А.Г., Зарицкий Г.А. (ФГУП «Красная Звезда»),
Пышко А.П., Плотников А.Ю. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Особенностью формирования радиационной обстановки на космическом аппарате с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ) является отсутствие окружающей среды, рассеивающей ионизирующее излучение. Это, с одной стороны, диктует жесткие правила компоновки, с другой, позволяет соответствующими конструктивно-компоновочными решениями существенно снизить массогабаритные характеристики космического аппарата. Такой вывод следует из проведенных в последнее время исследований, которые включали расчетно-конструкторские работы по изучению влияния различных компоновочных решений на формирование радиационной обстановки на борту космического аппарата. Их актуальность была обусловлена существенным увеличением мощности ядерного реактора по сравнению с космическими ЯЭУ первого поколения «Бук» [1], «Топаз» [2] и возрастанием ресурса до 10 лет и более. Одновременно современные космические аппараты имеют в своем составе различные крупногабаритные объекты (холодильники-излучатели, антенны и др.) и снабжены радиоэлектронной аппаратурой, обладающей повышенной чувствительностью к ионизирующему излучению. В связи с этим радиационная защита ЯЭУ второго поколения должна обеспечивать кратность ослабления, в 10—100 раз превышающую аналогичную для ЯЭУ первого поколения.

Одним из главных результатов работ является вывод о невозможности при существующих ограничениях на массу достичь требований по допустимым потокам ионизирующего излучения снабжением ЯЭУ традиционной в обычном понимании радиационной защитой. Необходимо применение всех средств, имеющихся в распоряжении разработчика. К ним относятся снабжение ЯЭУ теневой радиационной защитой, общая компоновка космического аппарата, компоновка отсека с радиационно-чувствительной аппаратурой, ее размещение в нем, использование соответствующих материалов в отдельных элементах конструкции и др. Все они в той или иной мере могут способствовать достижению поставленной цели и являются, таким образом, средствами радиационной защиты. Их выбор, оптимизация и последующее применение позволят в итоге достичь требуемых массогабаритных характеристик.

Введение в практику понятия «средства радиационной защиты» существенно расширило поле оптимизации и позволило перейти к принципиально новому под-