

ваны в разработке чистых, безопасных, снижающих риск распространения ядерных материалов атомных станций, приемлемых для США и России, а также стран третьего мира. Модульный гелиевый высокотемпературный газовый реактор представляет собой перспективный вариант для этой цели благодаря высокой безопасности, обеспечению режима нераспространения делящихся материалов, основанного на свойствах керамического топлива, и высокотемпературному потенциалу. И США, и Россия обладают хорошо развитой технологией ВТГР, в том числе экспериментальной базой, которая может быть эффективно использована для разработки промышленных атомных станций с ВТГР. ВТГР применим для выработки электроэнергии и промышленного высокопотенциального технологического тепла. Гибкость ВТГР по отношению к различным топливным циклам допускает использовать в нем различное топливо без изменения основных элементов конструкции активной зоны реактора. Модульный принцип исполнения, применение для альтернативных целей и гибкое использование топливных ресурсов делают атомную станцию с ВТГР привлекательной для строительства во всем мире, включая развивающиеся страны. ВТГР могут быть одним из направлений сотрудничества России и США в области ядерной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лёгасов В.А., Пономарев-Степной Н.Н., Проценко А.Н. и др. Перспективы использования и основные проблемы внедрения ВТГР в технологические процессы и электроэнергетику. — Атомная энергия, 1978, т. 45, вып. 6, с. 411—418.
2. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. Эволюция энергетики в XXI в. М.: ИздАт, 2008.
3. Melese G., Katz R. Thermal and Flow Design of Helium-Cooled Reactors. American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, USA, 1984.
4. Rodrigues C., Simon W. The Modular HTGR: Design for Safety and Availability. General Atomics, April, 1989.
5. Kiryushin A.I., Kodochigov N.G., Kuzavkov N.G., Golovko V.F. State of HTGR development in Russia. Design and development of gas cooled reactors with closed cycle gas turbines. — In: Proc. Technol. Com. Meeting Held in Beijing, China, 30 October — 2 November 1995. Vienna: IAEA-TECDOC-899, 1996, p. 31—46.
6. McDonald C. Exploitation of the very high temperature capability of the MHTGR to meet national energy needs after the year 2000. — In: Proc. of the 21st IECEC, 1986, P. 869069.
7. Kiriushin A.I., Ponomarev-Stepnoi N.N., Glushkov E.S. et al. The project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine. — Nucl. Engng Design, 1997, v. 173, p. 119—129.
8. Кодочигов Н.Г., Сухарев Ю.П., Пономарев-Степной Н.Н. Международная программа разработки топлива ГТ-МГР. Доклад на совещании МАГАТЭ «Состояние и перспективы топлива газоохлаждаемых реакторов». Вена, Австрия, 07—09 июня 2004 г.

Поступила в Редакцию 18.12.09

УДК 541.15+621.039.577

СТАБИЛЬНОСТЬ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В КОНТУРЕ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

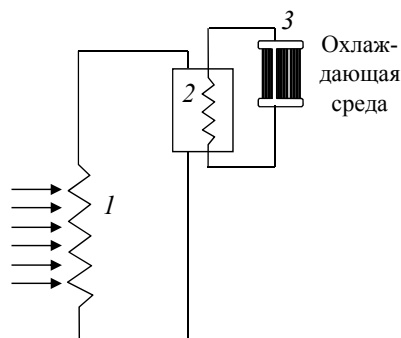
Карнаухов В.Е., Верховская А.О., Степанов О.Е., Буланов А.В., Лукашенко М.Л., Кабакчи С.А.
(ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Перспективным решением, направленным на повышение безопасности первого контура ЯЭУ, является пассивная система расхолаживания [1]. Она должна оставаться работоспособной в течение продолжительного времени не только без вмешательства персонала, но и при отсутствии электроэнергии. Независимость функционирования от подвода энергии и защита от отказов активных компонентов могут быть обеспечены реализацией принципа внутренне присущей са-сдувок, предназначенных для удаления неконденсирующихся газов.

мозащищенности — использование естественных процессов, а именно естественная циркуляция теплоносителя и саморегулируемый водно-химический и газовый режим.

В настоящей работе рассматривается пассивная система аварийного охлаждения ЯЭУ, состоящая из двух контуров (рис. 1): контура расхолаживания реакторной установки и охлаждающего аммиачного контура. Особенностью рассматриваемой системы является отсутствие

Контур расхолаживания предназначен для непосредственного отвода тепла от реакторной



установки. Он состоит из участков теплообмена с реакторным контуром и конденсации образующегося пара. Из нижней части участка теплообмена водный теплоноситель движется восходящим потоком, где подогревается до температуры насыщения, испарения и перегрева пара. Перегретый пар по отводящим паропроводам поступает в аммиачный теплообменник, который отдает тепло охлаждающему контуру с аммиаком, после чего возвращается на вход участка теплообмена.

При движении через участок теплообмена теплоноситель подвергается воздействию нейтронного и γ -излучения, что обуславливает образование радиолитических газов. В условиях замкнутого контура без сдувок неконденсирующиеся газы — водород и кислород накапливаются в теплоносителе, что может нарушить функционирование установки, в частности, снизить эффективность работы конденсатора и в результате привести к нарушению циркуляции теплоносителя.

Общий подход к моделированию водно-химического и газового режима в контуре пассивной системы. В настоящей статье предлагается подход к моделированию водно-химического и газового режима для переходных и стационарных режимов работы системы, базирующийся на философии конструктора [2]. Контур разбивается на стандартные узлы, число которых и взаимодействие между которыми будут определяться особенностями конструкции контура и целью решаемой задачи. В каждом узле моделируются радиационно-химические и массообменные превращения водного теплоносителя. Модельные узлы представляют собой простые идеализированные системы, взаимодействие которых заключается в перетоке рассматриваемых химических компонентов теплоносителя — H_2 , O_2 и H_2O_2 .

Методика описания водно-химического и газового режима заключается в одновременном

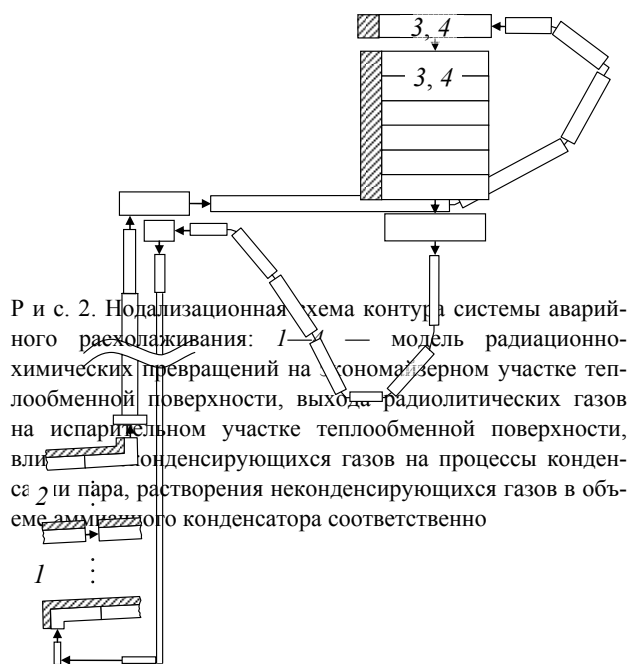
моделировании процессов радиационно-химических преобразований фаз водного теплоносителя под действием излучения, процессов межфазного массообмена и транспортировки химических компонентов теплоносителя по контуру.

Предложенный метод предполагает объединение в рамках единой расчетной модели интегрального теплогидравлического кода и специальных программных модулей, описывающих массообменные и радиационно-химические процессы и явления. Комплекс строится по принципу открытой архитектуры, разрешая в случае необходимости подключать соответствующие физические модели. Необходимые программные модули задействуются только в областях протекания соответствующих процессов.

Теплофизические характеристики контура пассивной системы моделируются с помощью интегрального теплогидродинамического кода улучшенной оценки RELAP5/Mod. 3.3 [3]. На нодализационной схеме показаны области расчетной модели контура, где подключали специализированные программные модули (рис. 2). Областью радиационно-химических процессов является соответственно экономайзерный участок теплообменной трубчатки (см. рис. 1), областями межфазного массопереноса газов — ее испарительный участок и верхний объем аммиачного конденсатора, где конденсируется пар и есть граница раздела фаз. Результатом математического моделирования должна стать оценка скоростей протекания взаимовлияющих процессов: скорости выхода и растворения радиолитических газов, образования и рекомбинации молекулярных продуктов радиолиза и как следствие оценка возможности возникновения саморегулируемого водно-химического и газового режима в контуре установки.

Методика описания массообменных процессов приведена в работе [2]. В методике реализован подход к определению скорости массообменных процессов с участием газов (выход в парогазовую фазу и растворение при конденсации пара) с учетом режимов течения теплоносителя на основе коэффициентов массоотдачи и площади межфазной поверхности.

Модель взаимодействия радиолитических водорода и кислорода на экономайзерном участке. При наличии на входе в экономайзерный участок теплообменной трубчатки молекулярного водорода с концентрацией, превышающей стационарную при заданной мощности до-



Р и с. 2. Нодализационная схема контура системы аварийного расхолаживания: 1 — модель радиационно-химических превращений на экономайзерном участке теплообменной поверхности, выход радиолитических газов на испарительном участке теплообменной поверхности, влияние конденсирующихся газов на процессы конденсации пара, растворения неконденсирующихся газов в объеме аварийного конденсатора соответственно

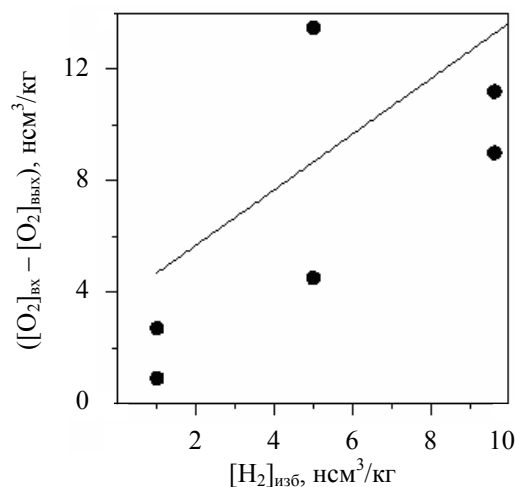
зы и температуре (далее — избытка водорода), подавляется образование радиолитического кислорода при прохождении теплоносителя этого участка. Соответственно снижается его стационарная концентрация в теплоносителе. С помощью модуля H₂O-rad (терморadioлиз водного теплоносителя), входящего в программное средство МОРАВА-H₂ [4], проведены варианты расчетов для определения максимального количества прореагировавшего кислорода при однократном прохождении теплоносителя через экономайзерный участок. Исследовалось влияние избытка водорода и концентрации кислорода на входе в этот участок на количество прореагировавшего кислорода.

Для каждой начальной концентрации кислорода рассчитывали соответствующую ей стехиометрическую концентрацию водорода. К

этой концентрации добавляли варьируемую концентрацию избыточного водорода $[H_2]_{изб}$ и рассчитывали изменение концентрации кислорода при прохождении теплоносителем экономайзерного участка теплообменной трубки. Если весь кислород прореагировал до выхода теплоносителя из экономайзерного участка, то принятая начальная концентрация кислорода увеличивалась, и проводился новый расчет. Если концентрация кислорода в конце экономайзерного участка оказывалась больше нуля, то начальная концентрация кислорода уменьшалась, и расчет проводился вновь. Процедура расчета считалась законченной, когда на момент выхода теплоносителя из экономайзерного участка концентрация кислорода стремилась к нулю.

На рис. 3 представлены результаты моделирования. На основе полученных данных построена аппроксимационная прямая, характеризующая максимально возможное изменение концентрации кислорода $[O_2]_{вх} - [O_2]_{вых}$ при прохождении теплоносителем экономайзерного участка в зависимости от концентрации избыточного водорода, установленной на входе в трубку. Точки, расположенные выше прямой, означают, что кислород не прореагировал полностью до покидания, ниже прямой — весь кислород полностью прореагировал раньше покидания теплоносителем экономайзерного участка. В интервале $[H_2]_{изб} = 1-10$ нсм³/кг прямая может быть представлена уравнением

$$[O_2]_{вх} - [O_2]_{вых} = [H_2]_{изб} + 3,6 \text{ нсм}^3/\text{кг}.$$



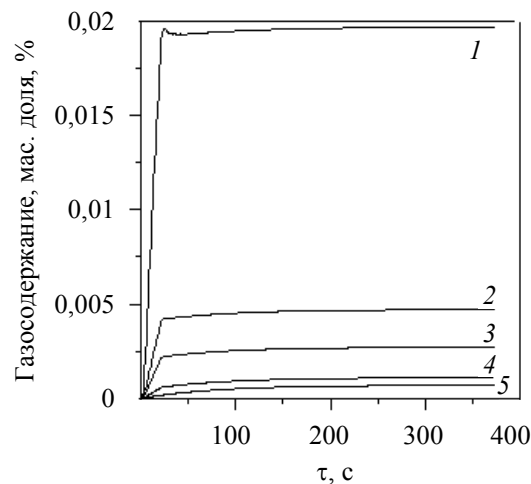
Р и с. 3. Зависимость максимального количества связываемого кислорода от количества избыточного водорода при прохождении теплоносителем экономайзерного участка теплообменной трубки

Изменение концентрации водорода при этом соответствует стехиометрическому отношению. Результирующая концентрация радиолитических газов на выходе составляет разницу между входной концентрацией и ее изменением при прохождении экономайзерного участка теплообменной трубчатки.

В расчетах принималось, что на участке теплообмена температура жидкой фазы повышается от 80 до 244 °С, мощность поглощенной теплоносителем дозы излучения на участке теплообмена постоянная и равна 1,86 Гр/с для быстрых нейтронов и 58,6 Гр/с для γ -излучения. Концентрация кислорода на входе в трубчатку варьировалась в диапазоне 0,9—13,5 нсм³/кг.

Моделирование водно-химического и газового режима в контуре пассивной системы. Помимо радиолитических газов, в контуре возникает водород коррозионного происхождения, который способствует подавлению радиолиза. Минимальная скорость его образования с учетом удельной скорости коррозии 0,0074 г/(м²·ч) составила 0,0025 ндм³/ч, максимальная — 0,04 ндм³/ч [5]. Если в теплоносителе не будет кислорода в концентрации, достаточной для его связывания, то в контуре будет накапливаться водород. Оценка показала, что через 100 ч работы следует ожидать накопления в теплоносителе как минимум 4 дм³ избыточного по сравнению со стационарным количеством водорода радиолитического происхождения.

Расчетная зависимость изменения массового газосодержания в верхней части аммиачного конденсатора нормально функционирующей системы от наличия в контуре избыточного количества введенного извне водорода приведена на рис. 4. В течение первых 20 с моделировали дозировку водорода в контур, после чего подключали модели растворения газов и радиолитического газообразования. Массовое газосодержание в конденсаторе при этом быстро выходит на стационарные значения при любом рассмотренном избытке водорода, что обуславливается малым количеством образующихся радиолитических водорода и кислорода. Видно, что стационарное состояние устанавливается даже в том случае, если концентрация водорода, введенного извне, равна нулю. Такой факт позволяет сделать вывод не только о возможности существования в контуре саморегулируемого водно-химического и газового режима, но и об отсутствии необходимости добавления в контур



Р и с. 4. Зависимость массового газосодержания в элементе аммиачного теплообменника от времени при содержании водорода 5000 (1), 1000 (2), 500 (3), 100 (4), 0 нсм³ (5)

избыточного количества водорода для подавления образования радиолитического кислорода.

Полученные результаты позволяют сформулировать необходимые и достаточные условия наступления физико-химического стационарного состояния в контуре пассивной системы:

равенство скорости выхода радиолитических газов в парогазовую фазу теплоносителя на испарительном участке теплообменной поверхности и скорости их растворения в конденсаторе. Это условие характеризует первостепенное значение участка контура с организацией межфазного массопереноса (аммиачного теплообменника) как средства возврата газов в растворенное состояние, т.е. замыкания контура по газовой составляющей. Конструкционные, гидродинамические и теплофизические характеристики этого элемента контура должны обеспечивать высокую эффективность межфазного массообмена на участке конденсации;

равенство скоростей образования молекулярных продуктов радиолиза воды и их разложения на экономайзерном участке теплообменной трубчатки. В этом случае на облучаемом участке контура возникает динамическое радиационно-химическое стационарное состояние по молекулярным продуктам радиолиза воды. Эффективный возврат радиолитических газов в жидкую фазу теплоносителя обуславливает избыточное количество водорода в растворенной форме на входе в облучаемый участок. Это приведет к активизации протекания радиационно-химических реакций рекомбинации продуктов радиолиза под облучением, что скомпенсирует постоянный вынос образующихся продуктов

радиолиза в пар. Путем подбора параметров конденсации пара можно сравнять скорости образования и разложения радиолитических газов и добиться установления динамического стационарного состояния, при котором концентрация образовавшихся водорода и кислорода выходит на постоянное значение.

Таким образом, в контуре пассивной системы возможно установление саморегулируемого водно-химического и газового режима посредством дозирования избыточного водорода и соответствующего каждому случаю количества водорода и кислорода, скопившихся в элементах установки.

Сформулированные необходимые и достаточные условия наступления динамического стационарного физико-химического состояния в контуре с двухфазным теплоносителем при учете совместного протекания в нем взаимовлияющих водно-химического и теплогидродинамического режимов будут в одинаковой мере правомерны для всех замкнутых контуров с кипящим теплоносителем, имеющих области облучения теплоносителя и области с наличием раздела фаз.

Показана возможность достижения стационарного газового состояния в контуре пассивной системы не только при всех дозируемых избытках водорода, но и при наличии в контуре избытка водорода, образующегося при коррозии

оборудования, что позволит отказаться от необходимости добавления в контур водорода извне в виде аммиака или газа для регулирования водно-химического и газового режима.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 08-08-00070-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Вахрушев В.В. и др. Экспериментальное обоснование контура охлаждения системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки проекта АЭС-2006 для площадки Ленинградской АЭС. — Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 3, с. 148—152.
2. Лукашенко М.Л., Буланов А.В., Верховская А.О. и др. Моделирование водно-химического режима первого контура ЯЭУ с двухфазным водным теплоносителем. — Там же, 2006, т. 100, вып. 1, с. 19—24.
3. RELAP5/Mod3.2 Code Manual. V. VI. Validation of Numerical Techniques in RELAP5/MOD3.2. Washington, Dec. 2001.
4. Архипов О.П., Бугаенко В.Л., Кабакчи С.А. Аннотации программ, аттестованных Госатомнадзором РФ. Программное средство МОРАВА Н2. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2005, вып. 3, с. 65—70.
5. Герасимов В.В., Монахов А.С. Коррозия реакторных материалов. М.: ЦНИИатоминформ, 1994.

Поступила в Редакцию 13.11.09

УДК 621.039.566

КОНТРОЛЬ РАСХОДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КАНАЛЕ РБМК НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ОБ АКТИВНОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Загребаяев А.М., Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В. (НИЯУ МИФИ, г. Москва), Егоров М.И., Полянских С.А., Речкиман А.Э. (Курская АЭС, филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом», г. Курчатова), Жуков И.В., Потапов А.А. (ОАО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалева», г. Москва)

Расход теплоносителя через технологический канал является одним из важных параметров, определяющих безопасную работу энергоблока с РБМК. Штатный контроль расхода осуществляют шариковые расходомеры ШТОРМ-32М, расположенные на трубопроводах водяных коммуникаций, по которым теплоноситель поступает на вход в каждый техноло-

гический канал [1]. В процессе эксплуатации расходомеров возрастает погрешность определения расхода вследствие механического износа шарика и дорожки качения, изменения режима течения и др. [2]. В практике эксплуатации РБМК возникают ситуации, когда расходомеры выходят из строя или их показаниям нельзя доверять. Это накладывает дополнительные огра-