

УДК 621.039.5

ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ ПРИ ЗАБРОСЕ ПУЗЫРЕЙ ПАРА В АКТИВНУЮ ЗОНУ РЕАКТОРА БРЕСТ-ОД-300

*Давыдов В.К., Журнов А.П., Калугина К.М., Лемехов В.В., Моисеев А.В.,
Смирнов В.С., Уманский А.А. (АО «НИКИЭТ», г. Москва)
e-mail: sval@nikiet.ru*

Одними из наиболее актуальных и обсуждаемых исходных событий для реакторов с интегральной конструкцией типа БРЕСТ с парогенератором, встроенным в контур теплоносителя, являются разрыв теплообменных труб или образование в них трещин с забросом в свинцовый теплоноситель пароводяной смеси в виде пузырей пара. Интерес к последствиям этих событий связан с опасностью не только роста давления в корпусе реактора, но и ввода большой положительной реактивности при прохождении через активную зону теплоносителя с пузырями пара из-за реализации большого положительного пустотного парового эффекта. Однако высокая плотность свинцового теплоносителя и выбранная конструкция свинцового контура с нетрадиционной схемой его циркуляции приводят к тому, что попадание в активную зону теплоносителя с большим объемным паросодержанием в виде пузырей исключено или отрицательная составляющая эффекта реактивности из-за высокой плотности пара в пузырях оказывается достаточной для компенсации положительной пустотной составляющей эффекта.

Сценарии заброса паровых пузырей в активную зону. Пустотный паровой эффект реактивности, реализующийся при попадании в активную зону пузырей пара, является результатом наложения нескольких противоположных по знаку составляющих:

положительной пустотной составляющей в результате уменьшения эффективной плотности разбавленного пузырями свинца, что приводит к снижению поглощения нейтронов свинцом, ужесточению спектра нейтронов и росту доли делений на плутонии и пороговых изотопах;

отрицательной паровой составляющей, которая связана с наличием в пузырях паров воды, приводящих по мере увеличения в них плотности пара к смягчению спектра нейтронов и снижению доли делений на плутонии и пороговых изотопах, а также к росту поглощения нейтронов водородом. При этом основной отрицатель-

ный вклад в реактивность вносит спектральный эффект;

отрицательной пустотной составляющей, обусловленной ростом утечки нейтронов в результате разбавления теплоносителя пузырями особенно на периферии активной зоны, в ее торцевых и боковом отражателях.

В выбранной конструкции контура с нетрадиционной схемой циркуляции теплоносителя главные циркуляционные насосы (ГЦН) не нагнетают охлажденный в парогенераторе теплоноситель непосредственно на вход в активную зону, как это обычно принято на практике, они закачивают его на верхний уровень опускного участка контура, откуда он по принципу сообщающихся сосудов самотеком опускается вниз, разворачивается, проходит, нагреваясь, снизу вверх через активную зону, поднимается до верхнего уровня на входе в парогенератор, где снова разворачивается и, отдавая тепло трубам пароводяного контура, стекает вниз, в приемную камеру ГЦН. В этой схеме напор и расход теплоносителя через активную зону определяются разницей не только создаваемых ГЦН уровней в опускном (до активной зоны) и подъемном участке (после активной зоны), но и разницей плотности теплоносителя на этих участках. Рост доли пузырей в теплоносителе на опускном участке ведет к снижению его пропускной способности вплоть до остановки циркуляции.

В сценариях с межконтурной течью в парогенераторе наряду с медленным и длительным истечением пароводяной смеси из трещин рассматривался и разрыв труб. Расчетные исследования показали, что наиболее опасным является гильотинный разрыв в нижней части парогенератора. Максимальная скорость выброса пароводяной смеси при разрыве одной трубы $G_{пв}$ примерно равна 0,8 кг/с. Эффективная длительность выброса $\Delta t \sim 15$ с. Если постулировать, что, попав в свинец, выброс превращается исключительно в паровые пузыри, которые в составе теплоносителя закачиваются ГЦН на

верхний уровень опускного участка контура, то при давлении в газовой полости $P_{г.п} \sim 0,1$ МПа, температуре $T \sim 700$ К и номинальном расходе свинца $G_{рб} \sim 3,8$ м³/с объемная доля пузырей пара в свинцовом теплоносителе при разрыве одной трубы составит $\varepsilon_{п.с} \sim 40\%$ [1]. Но теплоноситель с таким содержанием пузырей пройти опускной участок и попасть в активную зону не может. Расчеты, выполненные с учетом конструкции контура БРЕСТ-ОД-300, его геометрии, координат уровней и параметров теплоносителя в рабочем состоянии, показали, что снижение плотности теплоносителя в опускном участке из-за роста в нем доли пузырей до $\varepsilon_{п.с} \geq 20\%$ приведет к остановке циркуляции теплоносителя. Это означает, что особенности конструкции контура БРЕСТ-ОД-300 ограничивают пропускную способность опускного участка максимальным содержанием пузырей в теплоносителе $\varepsilon_{п.с} \leq 20\%$.

На основании определенного пропускного критерия по содержанию пузырей в опускном участке контура, а также доли пузырей в теплоносителе при разрыве одной трубы рассматривать массовый разрыв труб в отношении ввода реактивности не имеет смысла, его рассмотрение в отношении роста давления с повреждением корпуса реактора, разгерметизацией контура свинца и других явлений с возможным выбросом радионуклидов не являлось темой настоящей статьи. Эксперименты в АО «ВНИИТФ» показали, что трубы парогенератора реактора БРЕСТ имеют большой запас прочности и их разрыв с заранее внесенными дефектами не приводит к разрыву соседних [2].

Следует отметить, что принятый критерий $\varepsilon_{п.с} \leq 20\%$ избыточен. Опыт работы по водородной очистке контуров с тяжелым теплоносителем (свинцом, свинцом—висмутом) при скорости циркуляции теплоносителя $< 0,6$ м/с свидетельствует об отсутствии переноса газовой фазы по контуру даже при образовании и впрыске газовых пузырей в теплоноситель специальным устройством, формирующим пузыри диаметром менее 1 мм, что свидетельствует о полной и незамедлительной сепарации пузырей [3].

В действительности при разрыве труб рождаются и приходят на вход опускного участка пузыри разного размера, но далее вниз проходят только те, для которых сила Стокса превышает силу Архимеда:

$$6\pi\gamma_{рб}ud > (\pi d^3/6)\gamma_{рб}g,$$

где ν , $\gamma_{рб}$ — кинематическая вязкость и плотность свинца соответственно; u — скорость пузырей относительно свинца; d — диаметр пузыря; g — ускорение свободного падения.

Из равенства сил Стокса и Архимеда можно определить скорость пузырей относительно свинца при фиксированном диаметре пузыря:

$$u = (d^2/36\nu)g,$$

из равенства по модулю скорости свинца на верхнем уровне опускного участка вниз (w_0) и скорости пузырей относительно свинца (u) вверх — критический (пропускной) размер пузыря:

$$d_{кр} = 6\sqrt{w_0\nu/g}.$$

При проектной скорости свинцового теплоносителя в опускном участке $\leq 0,3$ м/с для захвата пузыря потоком свинца его диаметр должен быть меньше критического $d_{кр} \sim 0,45 \cdot 10^{-3}$ м.

На верхнем уровне опускного участка на пузырь в свинце извне действует давление в газовой полости $P_{ат} \sim 0,1$ МПа, а также избыточное давление в пузыре $\tau = 4\sigma/d$, определяемое размером пузыря d и силой поверхностного натяжения в свинце с коэффициентом $\sigma = 0,45$ Н/м. На верхнем уровне в критическом пузыре $\tau_{кр} = 4 \cdot 10^{-3}$ МПа, суммарное внешнее давление

$$P_0 = P_{ат} + \tau_{кр} \sim 0,104 \text{ МПа}.$$

На уровне активной зоны внешнее давление на пузыри увеличивается примерно в 10 раз за счет гидростатического давления столба свинца $\Delta P_{гс}$, а также из-за уменьшения размера самого пузыря, ведущего к росту сжимающих сил поверхностного натяжения (избыточного давления τ). Для пузырей с близким к критическому размером внешнее давление

$$P_1 = P_{ат} + \tau + \Delta P_{гс} \sim 1 \text{ МПа}.$$

Внешнее давление на пузырь уравнивается внутренним давлением пара в пузыре $P_{п.п}$. Пузыри с близким к критическому размером $d \leq d_{кр}$ по мере заглубления на опускном участке контура и роста внешнего гидростатического давления столба свинца подвергаются пропорциональному сжатию, которое приводит к уменьшению размера и объемной доли нежест-

ких пузырей в теплоносителе в 5—10 раз и соответственно к снижению положительной пустотной составляющей пустотного парового эффекта реактивности.

Методика нейтронно-физического расчета. При прохождении через активную зону пузырей пара зависимость эффекта реактивности от их объемного содержания в свинцовом теплоносителе, плотности пара и пространственного распределения определялась путем расчетов с использованием комплекса MCU-BR с поточечным представлением ядерных сечений [4]. Конструкция реакторной установки была представлена в виде трехмерной расчетной модели с детальным описанием геометрической структуры и материального состава активной зоны и ее окружения, библиотека ядерных сечений была сформирована на основе файлов оцененных данных ENDF/BVII.1, JENDL-4.0, РОСФОНД с использованием комплекса NJOY [5—8].

В расчетах состав теплоносителя представлен гомогенизированной смесью свинца и пузырей пара с параметрами при номинальной мощности реактора. Объемная доля пузырей в теплоносителе учитывалась путем снижения плотности смеси, концентрация водяного пара в смеси определялась, исходя из постулируемой объемной доли пузырей в смеси и плотности в них пара, зависящей в соответствии с законом идеального газа от давления пара в пузыре и температуры паросвинцовой смеси:

$$P_{п.п} = (RT/M)\gamma_{п.п},$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная; $M = 18$ г/моль — молярная масса водяного пара; $\gamma_{п.п}$ — плотность пара в пузыре, которая при средней температуре теплоносителя в активной зоне $T = 750$ К может быть выражена через давление пара в пузыре $P_{п.п}$ соотношением $\gamma_{п.п} \sim 2,9 \cdot 10^{-3} P_{п.п}$.

Гомогенизированная плотность пара $\gamma_{п.с}$ в свинцовом теплоносителе равна $\gamma_{п.п}\epsilon_{п.с}$, гомогенизированная плотность свинцового теплоносителя при наличии в нем пузырей пара определяется как $\gamma_{рб} = \gamma_0(1 - \epsilon_{п.с})$, где γ_0 — номинальная плотность свинцового теплоносителя без пузырей.

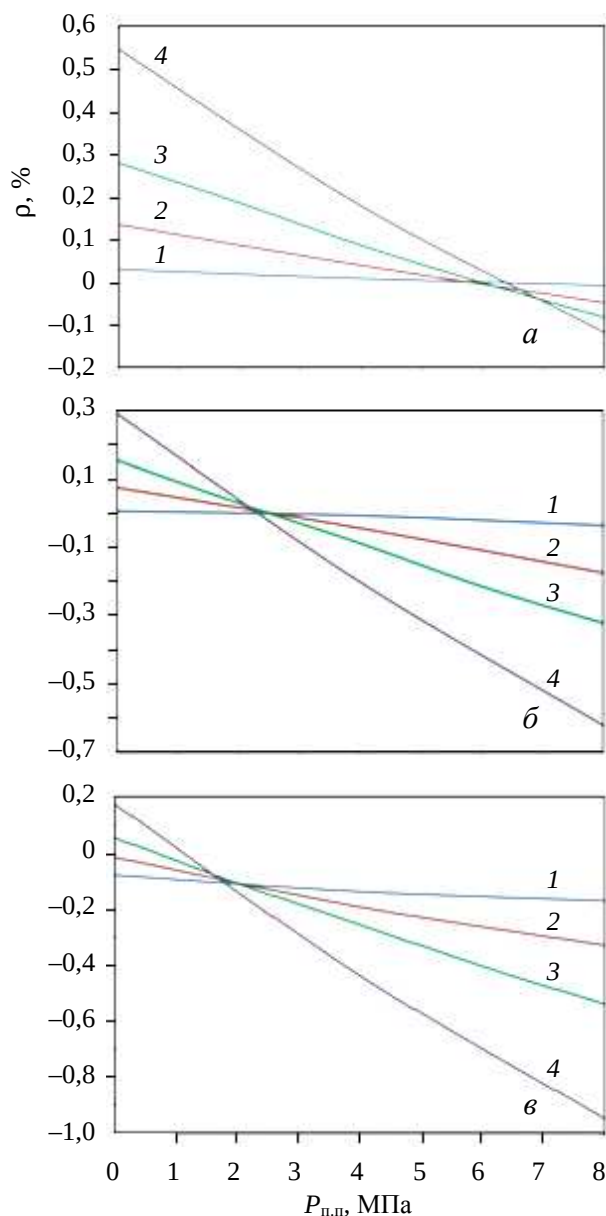
Расчетная модель реактора включает топливную часть активной зоны с нитридным уран-плутониевым топливом, боковой и торцевые

отражатели, а также примыкающие к ним внутриреакторные элементы конструкции. Набранная из ТВС топливная часть активной зоны разделена на две радиальные области — центральную и периферийную с отношением числа содержащихся в них ТВС $\sim 2/1$.

Эффекты реактивности при забросе пузырей пара в активную зону без учета их сепарации и сжатия. В расчетах постулировалось, что пузыри разного размера и, следовательно, с разной плотностью пара, выраженной через давление при температуре 750 К, распределены равномерно в рассматриваемых зонах. При этом допускалось, что в качестве исходной плотности пара в расчетной зоне можно принять плотность, усредненную по объему этой зоны. В расчетах не учитывались сепарация и сжатие пузырей на пути к активной зоне.

Как следует из рис. 1, а, при забросе пузырей пара в топливную часть активной зоны, включающую ее центральную и периферийную области, максимальная положительная реактивность $\Delta\rho = 0,55\%$ ($\sim 1,5 \beta_{эф}$) реализуется при максимальной доле пузырей $\epsilon_{п.с} = 20\%$ и минимальном (нулевом) содержании в них пара (пустотная составляющая эффекта реактивности). С уменьшением объемной доли пузырей и увеличением в них плотности пара (ростом давления) реактивность снижается до отрицательной. Для полной компенсации пустотной составляющей необходимо, чтобы при доле пузырей до $\epsilon_{п.с} = 10\%$ давление пара в них составляло $P_{п.п} \sim 6$ МПа, при $\epsilon_{п.с} = 20\%$ — $P_{п.п} \sim 6,5$ МПа. При таком давлении усредненная по объему плотность пара и размер пузырей равны $\gamma_{п.п} \sim 0,017$ г/см³, $d \sim 0,36$ мкм и $\gamma_{п.п} \sim 0,019$ г/см³, $d \sim 0,33$ мкм соответственно.

При прохождении облака пузырей лишь через центральную область активной зоны положительная пустотная составляющая эффекта реактивности почти сохраняется, однако в этом случае ввод отрицательной паровой составляющей при увеличении давления в пузырях немного отстает. В результате при $\epsilon_{п.с} = 20\%$ пустотная составляющая компенсируется при $P_{п.п} \sim 7,4$ МПа, что соответствует усредненной по центральной части зоны плотности пара $\gamma_{п.п} \sim 0,022$ г/см³ и размеру пузырей $d \sim 0,28$ мкм.



Р и с. 1. Пустотный паровой эффект реактивности при прохождении пузырей пара в составе теплоносителя через активную зону с объемным содержанием пузырей 1 (1), 5 (2), 10 (3), 20% (4): а — локализация пузырей в топливной части активной зоны; б — охват пузырями топливной части зоны и торцевых отражателей; в — охват пузырями всей зоны, включая и боковой отражатель

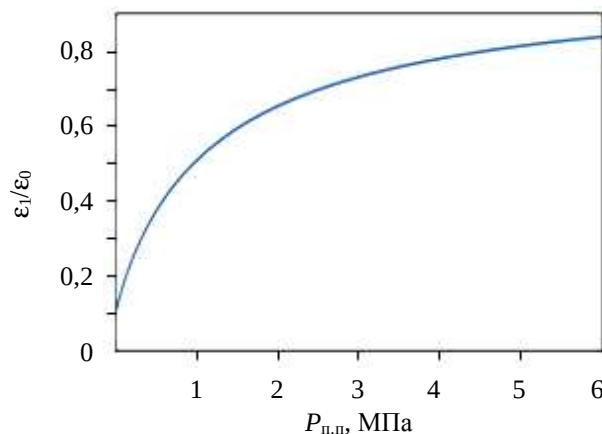
Распространение облака пузырей наряду с топливной частью активной зоны и на ее торцевые отражатели приводит к росту утечки нейтронов, снижению максимальной положительной пустотной составляющей эффекта реактивности до $\Delta\rho \sim 0,3\%$ ($\sim 0,8 \beta_{эф}$) и компенсирующего давления пара в пузырях до $\sim 2,5$ МПа при всех значениях $\epsilon_{п.с}$ (см. рис. 1, б). При этом давлении усредненный по охваченному пузырями объему размер пузыря равен $\sim 1,2$ мкм, плотность пара $\sim 0,007$ г/см³.

При распространении облака пузырей по всей активной зоне, включая и боковой отражатель, рост утечки нейтронов почти полностью компенсирует положительную пустотную составляющую, так что при относительно малом содержании пузырей в теплоносителе $\epsilon_{п.с} < 6\%$ даже в отсутствие пара переводит реактор в подкритическое состояние, как показано на рис. 1, в. Компенсирующая плотность пара в пузырях при $6\% < \epsilon_{п.с} < 20\%$ соответствует давлению пара от 0 до 1,2 МПа.

Пустотный паровой эффект реактивности с учетом сепарации и сжатия пузырей. Сепарация и сжатие пузырей на опускном участке контура теплоносителя автоматически и естественным образом решают проблему снижения объемной доли паровых пузырей и соответственно положительной пустотной составляющей при прохождении теплоносителя с пузырями через активную зону.

На рис. 2 показана учитывающая сжатие пузырей зависимость от избыточного давления в них τ_0 на верхнем уровне опускного участка, т.е. от размера пузырей на входе в опускной участок, и отношения ϵ_1/ϵ_0 , где ϵ_1 , ϵ_0 — объемная доля пузырей пара в теплоносителе на уровне активной зоны и на верхнем уровне опускного участка соответственно. В расчете этой зависимости принималось $\epsilon_0 = 10\%$, давление окружающей среды на верхнем уровне опускного участка контура $P_0 = 0,1$ МПа, на уровне активной зоны с учетом давления столба свинца — $P_1 = 1$ МПа.

Из анализа зависимости следует, что пузыри малого размера с высоким избыточным давле-



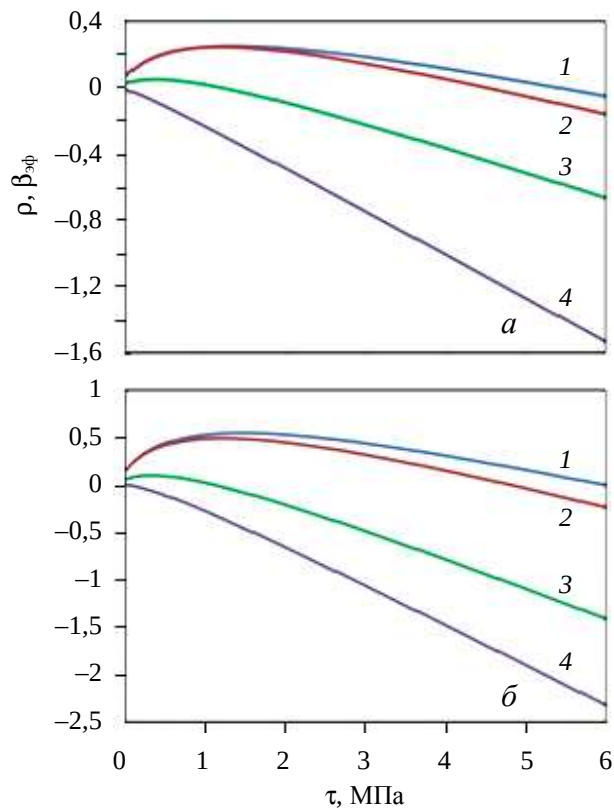
Р и с. 2. Зависимость степени сжатия пузыря пара на уровне активной зоны от избыточного давления (размера пузыря) на верхнем уровне опускного участка

нием, определяемым силой поверхностного натяжения в свинце, незначительно меняют свой объем при движении по контуру теплоносителя. Основную роль в компенсации положительной пустотной составляющей эффекта реактивности играет высокая плотность пара в них. Для более крупных пузырей с параметрами, приближающимися к критическим ($d \leq d_{кр}$), основную роль в компенсации положительной пустотной составляющей играет их сепарация перед входом в опускной участок контура, а также сжатие давлением гидростатического столба свинца. Такое давление на уровне активной зоны почти в 10 раз уменьшает объемную долю пузырей по сравнению с их долей на входе в опускной участок.

На рис. 2 не отражен эффект кинематического разрежения облака пузырей при их движении в опускном участке. Сжатие пузырей по мере их погружения вызывает рост отношения силы Стокса к силе Архимеда, что ведет к увеличению стратификации пузырей по скорости, растягивая облако в пространстве. Наложение эффектов сепарации, сжатия и кинематической стратификации почти обнуляет в активной зоне объемную долю пузырей с близкими к критическому размерами, наиболее чувствительных к изменению гидростатического давления среды.

Нейтронно-физические расчеты показывают, что при локальном гипотетическом забросе пузырей пара только в топливную часть активной зоны учет их сжатия на пути к активной зоне приводит к снижению максимального пустотного парового эффекта реактивности при $\epsilon_0 = 10\%$ до $\Delta\rho \sim 0,25 \beta_{эф}$, при $\epsilon_0 = 20\%$ до $\Delta\rho \sim 0,55 \beta_{эф}$ (рис. 3). Максимальный ввод реактивности соответствует забросу пузырей с избыточным давлением $\tau \sim 1\text{—}2$ МПа, т.е. размером $d \sim 1\text{—}2$ мкм. При охвате облаком пузырей и зон отражателей доминирующей является утечка нейтронов с отрицательной реактивностью, почти полностью компенсирующая положительную пустотную составляющую эффекта при любых параметрах пузырей.

Рассмотрим малую и длительную течь труб парогенератора с постепенным насыщением пузырями пара всего теплоносителя в результате его многократной циркуляции по контуру. Кон-



Р и с. 3. Зависимость реактивности от избыточного давления в пузырях при прохождении паросвинцовой смеси через центральную область топливной части активной зоны (1), всю топливную часть зоны (2), всю топливную часть зоны и торцевые отражатели (3), всю активную зону, включая и боковой отражатель (4): а, б — объемная доля пузырей в теплоносителе на верхнем уровне 10 и 20% соответственно

сервативно постулируем, что критерий насыщения свинца пузырями не ограничивает их объемную долю, поскольку размеры отвечают условию, исключающему всплытие пузырей. Так как рассматривается длительный процесс насыщения теплоносителя пузырями, то в отличие от залпового гипотетического заброса только в топливную часть активной зоны разумно допустить распространение насыщенного пузырями теплоносителя и на отражатели. В этом случае отрицательный вклад роста утечки нейтронов полностью компенсирует положительную пустотную составляющую эффекта реактивности. Течь труб и насыщение пузырями пара вызывают снижение плотности теплоносителя и приводят к увеличению его объема, фактически к изменению контролируемых уровней. Так, в случае образования трещин и течи труб с наложением отказов контроля выхода пара в контур разбавление теплоносителя пузырями до

$\epsilon_{п.с} \sim 1\%$ приведет к повышению уровня теплоносителя на $\sim 0,1$ м, разбавление до $\epsilon_{п.с} \sim 10\%$ — почти на 1 м. При большом объеме контура и небольшой скорости истечения пароводяной смеси из трещин насыщение теплоносителя пузырями пара и изменение уровней в контуре происходят медленно, что упрощает контроль развития процесса по показаниям уровнемеров и других приборов.

Таким образом, в рассмотренных сценариях аварий в результате разгерметизации парогенератора как при гильотинном разрыве труб и залповом забросе в активную зону пузырей пара в составе теплоносителя, так и при малой, но длительной течи труб с насыщением паровыми пузырями всего контура не могут быть реализованы эффекты реактивности, вызывающие быстрый неконтролируемый рост мощности с превышением пределов безопасной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963.
2. Абрамов А.В., Ковалев Е.О., Колесников П.А. и др. Исследование процессов в свинцовом теплоносителе при нарушении целостности теплообменной трубы парогенератора БРЕСТ-ОД-300. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 3, с. 164—168.
3. Ульянов В.В., Гулевский В.А., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И. Водородная очистка поверхностей циркуляционных контуров в моноблочных РУ с теплоносителями Pb и Pb—Bi. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах (Теплофизика-2010). Межотрас. семинар, 20—22 октября 2010 г. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2010, с. 42—44.
4. Алексеев Н.И., Большагин С.Н., Гомин Е.А. и др. Статус MCU-5. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 4, с. 4—23.
5. MacFarlane R., Kahler A. Methods for Processing ENDF/BVII with NJOY. LA-UR-10-04652, 2010.
6. Shibata K., Iwamoto O., Nakagawa T. JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering. — J. Nucl. Sci. Technol., 2011, v. 48(1), p. 1—30.
7. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н. и др. РОСФОНД — российская национальная библиотека нейтронных данных. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 2007, вып. 1—2.
8. The NJOY Nuclear Data Processing System, User Manual. LA-9303, 1981, v. 1.

Поступила в Редакцию 10.11.20

УДК 544.344.012-14-13

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Леонов А.А., Макаревич А.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)
e-mail: chud@ibrae.ac.ru

В последнее время все более актуальными становятся задачи, требующие применения методик для двухфазного течения трехкомпонентной смеси в целях обоснования безопасности и анализа последствий исходных событий. Например, для реактора БРЕСТ-ОД-300 при возникновении течи парогенератора требуется обоснование того, что вводимая реактивность не угрожает безопасности функционирования реактора при попадании пузырей пара в активную зону. Следующая актуальная задача касается анализа последствий исходного события разгерметизации твэла. В этом случае необходимо показать, что истечение газа не приведет к нарушению охлаждения соседних твэлов. Нако-

нец, такая методика расчета может быть использована для обоснования режима регенерации свинца, при котором газовая смесь впрыскивается в поток теплоносителя и необходимо показать, что регенерирующая смесь эффективно циркулирует по всему объему первого контура. Таким образом, имеются практические важные задачи, требующие для своего решения трехмерного моделирования двухфазного течения трехкомпонентной смеси.

Для моделирования двухфазного течения двухкомпонентной смеси с учетом тепломассообмена предлагаются разные методики [1—7], для трехкомпонентной смеси подобные работы только начинаются.