

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.311.25:621.039

АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ КОДА ATHLET ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МАЛОЙ ТЕЧЬЮ НА СТЕНДЕ ИСБ—ВВЭР

Щепетильников Э.Ю., Мелихов О.И., Мелихов В.И.

*(Электрогорский научно-исследовательский центр
по безопасности атомных станций)*

Надежное моделирование поведения атомной станции в аварийной ситуации возможно лишь с помощью верифицированных компьютерных кодов. В соответствии с выработанной за последнее время методологией [1] программные средства верифицируются на данных локальных экспериментов, которые моделируют отдельные процессы, происходящие на АЭС или в ее элементах, результатах испытаний на крупномасштабных многопетлевых установках, представляющих собой макет реактора-прототипа, и данных о переходных процессах, имевших место на АЭС. На сегодняшний день реально функционирующей интегральной установкой является стенд ИСБ—ВВЭР (ЭНИЦ), который моделирует первый контур АЭС с ВВЭР-1000.

В целях создания банка данных тестовых экспериментов для верификации теплогидравлических кодов, применяемых в обоснование безопасности АЭС с ВВЭР, на ИСБ—ВВЭР проведены эксперименты по изучению аварий с малой течью размером 2,4 и 11 % от проходного сечения главного циркуляционного трубопровода [2, 3].

Целью настоящей работы является посттестовый анализ с помощью системного теплогидравлического кода ATHLET.

Теплогидравлический компьютерный код ATHLET (Германия) разработан для анализа проектных и нештатных стационарных переходных режимов, малых и средних течей, а также больших разрывов в реакторах с легкой водой в качестве теплоносителя [4].

Структура кода ATHLET модульная, что позволяет легко внедрять новые физические модели. Код состоит из нескольких основных модулей для расчета явлений, возникающих при работе легководных реакторов: теплогидравлики, теплопередачи и теплопроводности, нейтронной кинетики, управления и баланса энергетического блока. Для описания движения двухфазной пароводяной смеси используется математическая модель, включающая в себя уравнения сохранения массы и энергии отдельно для воды и пара и уравнение сохранения импульса для смеси. Для расчета относительной скорости фаз применяется полномасштабная модель дрейфа.

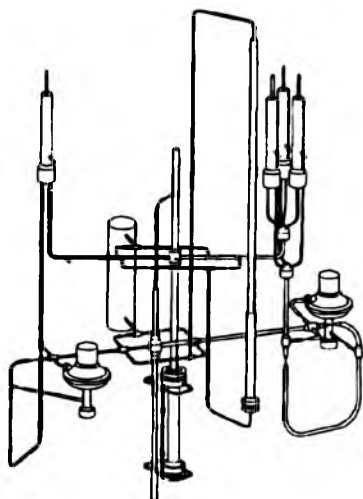
Модуль теплопередачи охватывает широкий диапазон условий для одно- и двухфазного потока. Включены корреляции для критического теплового потока и минимальной температуры пленочного кипения. Также имеется модель фронта повторного залива. Помимо этого в коде учитывается радиальная теплопроводность в конструкциях, топливных стержнях и электрических нагревателях.

Описание ядерной генерации тепла возможно с помощью модели точечной кинетики или одномерной модели. Для моделирования электрически обогреваемых стержней суммарная генерируемая мощность может быть задана как функция времени.

Пространственная дискретизация термогидродинамических уравнений сохранения основана на методе контрольного объема. Интегрирование по времени полученной нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений осуществляется с помощью высокоэффективного численного метода FEBE.

Расчеты, приведенные в настоящей статье, выполнены с помощью версии ATHLET MOD 1.1—Cycle D. Нодализационная схема ИСБ—ВВЭР. ИСБ—ВВЭР имитирует первый контур АЭС с ВВЭР-1000. Объемно-мощностный масштаб составляет 1:3000, высотный — 1:1 (рис. 1). Подробное описание конструкции стенда приведено в работе [5].

Две петли — аварийная и неаварийная с соотношением объемов 1:3 замыкаются на модель реактора, которая состоит из опускного участка, модели активной зоны, входной и выходной камеры и байпасного участка. Модель активной зоны представляет собой 19-стержневую сборку обогреваемых электрическим током имитаторов твэлов тепловой мощностью до 1,8 МВт. В аварийной петле расположен один, в неаварийной — три параллельно включенных парогенератора. На стенде также имеются компенсатор давления, САОЗ высокого и низкого давления, гидромкости и система сбора вытекающего из контура теплоносителя.



Р и с. 1. Общий вид ИСБ—ВВЭР

Нодализация схема ИСБ—ВВЭР с системой измеряемых в эксперименте и рассчитываемых при моделировании параметров содержит 71 теплогидравлический объект с 286 контрольными объемами и 215 соединениями, а также 40 теплопроводящих структур со 190 ичками.

Во всех теплогидравлических объектах, представляющих трубопроводы первого контура, применяется модель дрейфа для горизонтальных, вертикальных и наклонных каналов, в объектах, моделирующих кольцевые зазоры входной и выходной камер корпуса давления, — модель дрейфа в вертикальных кольцевых каналах, для рабочего участка с имитаторами твэлов — модель дрейфа для вертикального пучка. Для узла течи используется модель дрейфа в сочетании с моделью критического истечения.

Тепловые потери учитываются с помощью двух отдельных для первого и второго контура объектов с постоянными граничными условиями (давление 0,1 МПа, температура 20 °С) при постоянном коэффициенте теплоотдачи от поверхности теплоизоляции к окружающей среде 10 Вт/(м²·°С). Для первого контура вместе с дыхательным трубопроводом и компенсатором давления тепловые потери составляют 24 кВт, для четырех парогенераторов — 20 кВт.

Описание экспериментов. В обоих случаях рассматривали малую течь из выходной камеры с остановом циркуляционных насосов.

В первом случае после открытия течи размером 2,4% на 8-й с включали программу по уменьшению электрической мощности на сборке имитаторов твэлов и байпасного участка с одновременной подачей сигнала на отключение парогенераторов от подпитки питательной водой и сброса пара, на 13-й с отключали насосы. Во втором случае рассматривали течь 11%, сброс мощности на сборке начинали вместе с открытием течи, на 5, 9-й с отключали циркуляционные насосы, и парогенераторы отсекались от питательной воды и сброса пара.

Граничные условия в обоих случаях задавали следующим образом:

компенсатор давления подключен к горячему трубопроводу аварийной петли;

в байпасном участке установлены вставки с отверстиями диаметром 2 мм для моделирования протечек мимо зоны имитаторов;

в линии истечения для имитации обрыва трубопровода САОЗ установлен канал истечения с отношением длины к диаметру $l/d = 10$;

эксперименты заканчивали отключением электрической нагрузки на сборке имитаторов твэлов и байпасном участке при достижении температурой стенки имитаторов твэлов 450 °С (1-й случай) и 400 °С (2-й случай).

В таблице представлены основные параметры стационарного состояния.

Начальные условия эксперимента

Начальные условия	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
Первый контур				
Давление в выходной камере, МПа	15,85	15,7	15,74	15,8
Температура воды, °С:				
на входе в канал со сборкой имитаторов твэлов	296	297	289,6	289
в выходной камере	327	327	319	319
Мощность, кВт:				
сборки имитаторов	784	784	967,6	967,6
байпасного участка	5,1	5,1	4,92	4,92
термоэлектрического подогревателя	4,3	4,3	3,1	3,1
компенсатора давления				
Расход теплоносителя, кг/с:				
в неаварийной петле	3,3	3,333	4,297	4,297
в аварийной петле	1,1	1,111	1,452	1,452
Второй контур				
Давление в парогенераторе (аварийная/неаварийная петля), МПа	6,24/6,27	6,25/6,25	5,10/5,06	5,08/5,05
Температура воды на входе парогенератора (аварийная/неаварийная петля), °С	217/228	218/218	217/199	217/199

Результаты расчетов. После открытия клапана течи давление в первом контуре начинает уменьшаться вследствие выноса теплоносителя в течь (рис. 2), термоэлектрический подогреватель компенсатора давления работает по алгоритму поддержания давления в контуре, его мощность резко увеличивается до тех пор, пока уровень теплоносителя компенсатора давления не снизится до минимально допустимого. В элементах стенда начинает появляться пар вместе с опорожнением компенсатора давления. Вследствие истечения теплоносителя через течь запариваются парогенераторы по первому контуру. Поскольку по второму контуру они были изолированы по пару и питательной воде, то в них увеличивается давление. Снижение давления в парогенераторе аварийной петли в первом случае вызвано тем, что клапан на паропроводе свежего пара в течение 70 с не полностью закрыт.

Когда давление в контуре уменьшается до давления насыщения при температуре теплоносителя в холодной части стенда, начинается его кипение, затем с опорожнением модели и образованием уровня — стадия выкипания. При режиме с течью 2,4% давление в контуре стабилизируется на уровне 8 МПа, в случае течи размером 11% оно постепенно уменьшается из-за того, что в течь уносится по объему больше теплоносителя, чем образуется пара в модели активной зоны.

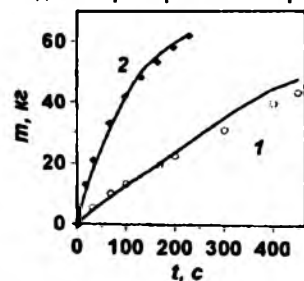
С течью размером 11% после 100-й с давление в первом контуре становится меньше давления во втором контуре, происходит изменение направления теплового потока, давление в парогенераторе следует за давлением в первом контуре. Вследствие этого примерно в то же время происходит разрыв циркуляции в обеих петлях, в то время как для течи размером 2,4% наблюдается положительный расход естественной циркуляции (рис. 3).

В результате выкипания теплоносителя и его уноса в течь уровень в модели активной зоны понижается. При наступлении кризиса теплоотдачи температура поверхности имитаторов твэлов превышает заданную (рис. 4), и мощность сборки снижается.

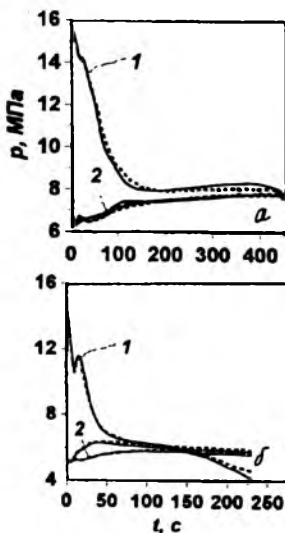
Параметрические расчеты показали, что время начала разогрева стержней связано с массой вытекшего через течь теплоносителя. В первом случае расчетная масса вытекшего теплоносителя 47 кг превысила экспериментальную 42 кг (рис. 5), несмотря на удовлетворительное количественное совпадение остальных параметров, что свидетельствует, по-видимому, о неточности измерения данной величины. Во втором расхождение экспериментальной и расчетной массы теплоносителя, вытекшего на момент наступления кризиса теплоотдачи, находится в пределах погрешности измерений 56,3 и 59 кг соответственно.

Наилучшее совпадение расчетов с экспериментальными данными (погрешности измерения параметров в эксперименте следующие: давление первого контура $\pm 0,17$ МПа, второго $\pm 0,085$ МПа, расход теплоносителя в петлях $\pm 0,018$ кг/с, в течь $\pm 0,015$ кг/с, температура оболочки твэлов $\pm 5,4$ К) получено при следующих характеристиках моделирования узла течи: TURB=1 — параметр, описывающий степень турбулизации потока в модели критического истечения (рекомендованное значение 20); FD=0,01 — коэффициент Дарси—Вейсбаха, характеризующий двухфазное трение (рекомендованное значение 0,05).

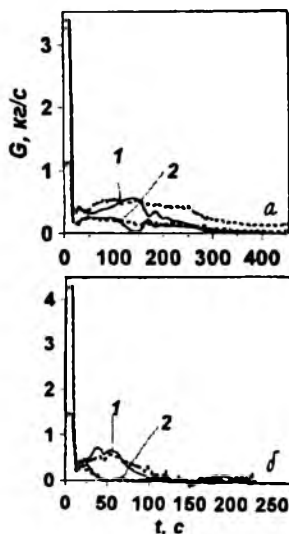
Выводы. Моделирование с помощью системного теплогидравлического кода ATHLET экспериментов с малой течью ВВЭР-1000 показало хорошее качественное и количественное совпадение расчетных и экспериментальных параметров. В расчетах адекватно воспроизведены основные явления, наблюдавшиеся в опытах, — поведение давления первого контура, кризис теплоотдачи и разогрев имитаторов твэлов.



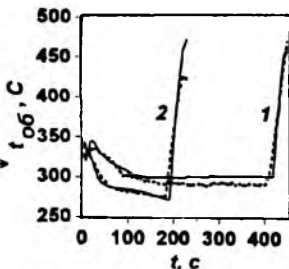
Р и с. 5. Масса теплоносителя, вытекшего из первого контура при течи размером 2,4 (1) и 11% (2)



Р и с. 2. Давление в первом (1) и втором контурах (2) при течи размером 2,4 (а) и 11% (б): —, - - - — расчет и эксперимент соответственно



Р и с. 3. Расход теплоносителя при течи размером 2,4 (а) и 11% (б) для неаварийной (1) и аварийной петли (2)



Р и с. 4. Температура поверхности оболочки твэлов при течи размером 2,4 (1) и 11% (2)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордон Б.Г., Гуцалов А.Т. Верификация программных средств для расчета аварийных режимов АЭС. — Теплоэнергетика, 1993, №8, с. 25—28.
2. Гашенко М.П., Прошутинский А.П., Столяров Е.В., Нигматуллин Б.И. Первая российская стандартная проблема безопасности (СПБ-1) на интегральном стенде ИСБ—ВВЭР. — Труды Межд. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР», ноябрь 21—24, 1995, Обнинск, т. 3, с. 80—87.
3. Российская стандартная проблема безопасности №2 (СПБ-2) на стенде ИСБ—ВВЭР. Течь 11% из выходной камеры реактора с последующим отключением циркуляционных насосов. Заключительный отчет 2.468, ЭНИЦ, 1997. 482 с.
4. Austrogesilo H., Lerchl G. ATHLET User's Manual. GRS-A 1/95.
5. Интегральный теплофизический стенд безопасности (ИСБ—ВВЭР): Препринт ИАЭ 5044/14, 1990.

Поступило в Редакцию 5.10.98

УДК 539.172.16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОФИЛЕЙ ТРАНСМУТАЦИОННЫХ НУКЛИДОВ

Дидик В.А., Малкович Р.Ш., Скорятина Е.А. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Козловский В.В.

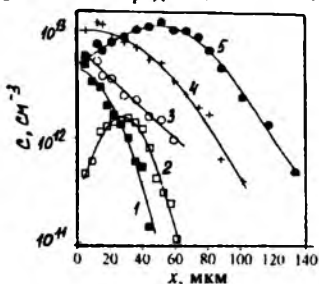
(Санкт-Петербургский государственный технический университет)

В работе [1] профили трансмутационных радионуклидов $^{71,72,74}\text{As}$ в соединениях A^{III}B^V , а также $^{66,67}\text{Ga}$ в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, образованных при облучении α -частицами, были использованы для определения энергетической зависимости сечения образования этих нуклидов $\sigma(E)$. В настоящей работе с аналогичной целью использовали профили ^{77}Br и ^{85m}Kr , а также ^{92m}Nb и $^{139,141}\text{Ce}$, образованных при таком же облучении в соединениях CuInSe_2 и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ соответственно. Указанные нуклиды создавали по реакциям [2] $^{74}\text{Se}(\alpha, p)^{77}\text{Br}$, $^{82}\text{Se}(\alpha, n)^{85m}\text{Kr}$, $^{89}\text{Y}(\alpha, n)^{92m}\text{Nb}$, $^{136}\text{Ba}(\alpha, n)^{139}\text{Ce}$ и $^{138}\text{Ba}(\alpha, n)^{141}\text{Ce}$.

Облучение проводили на циклотроне МГЦ-20 [3]. Были использованы плоскопараллельные образцы площадью 0,1—1 см^2 и толщиной 1—2 мм. В процессе облучения образцы контактировали с латунной пластиной, охлаждаемой водой. Энергия α -частиц составляла 16,8 МэВ в случае CuInSe_2 и 20 МэВ в случае $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Плотность потока частиц варьировала от $1,2 \cdot 10^{12}$ до $3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, время облучения — от 1 до 4 ч.

Профили трансмутационных радиоактивных изотопов определяли последовательным удалением тонких плоскопараллельных слоев и измерением наведенной γ -активности радионуклидов в каждом слое. Слои удаляли шлифованием, активность радионуклидов определяли с помощью аттестованного гамма-спектрометра с $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектором. Процедура определения сечения была такой же, как и в работе [1]. Погрешность определения сечения составляла $\pm 15\%$.

Как видно из рисунка, профили ^{77}Br , ^{139}Ce и ^{141}Ce являются монотонными кривыми, тогда как для ^{85m}Kr и ^{92m}Nb они представляют собой кривые с пологим максимумом. Найденные из полученных профилей значения σ представлены в таблице.



Профили концентрации атомов трансмутационных радионуклидов ^{77}Br (1), ^{85m}Kr (2), ^{139}Ce (3), ^{141}Ce (4) и ^{92m}Nb (5), образованных при облучении CuInSe_2 и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ α -частицами (концентрация соответствует моменту окончания облучения)

Сечения ядерных реакций, мб

E, МэВ	$^{74}\text{Se}(\alpha, p)^{77}\text{Br}$	$^{82}\text{Se}(\alpha, n)^{85m}\text{Kr}$	$^{136}\text{Ba}(\alpha, n)^{139}\text{Ce}$	$^{138}\text{Ba}(\alpha, n)^{141}\text{Ce}$	$^{89}\text{Y}(\alpha, n)^{92m}\text{Nb}$
10		29			5
11		67			17
12	40	143			44
13	86	237	34		85
14	160	266	79	28	155
15	253	227	131	65	240
16	375	114	203	108	309
17			300	179	347
18			510	211	269
19			804	184	120