

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, соглашение № 14.575.21.0049 (RGMEFI 57514X0049).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боголюбов Е.П., Рыжков В.И., Юрков Д.И. Научно-конструкторские, технологические и производственные возможности ФГУП ВНИИА по созданию нейтронных генераторов и аппаратуры на их основе. — В сб.: Межд.

научно-технич. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе», 2013, с. 15—18.

2. Маслеников С.П., Пастухов Н.А., Чеботарев А.В. и др. Физическая модель вакуумной нейтронной трубки импульсного нейтронного генератора. — Ядерная физика и инжиниринг, 2014, т. 5, № 3, с. 229—236.

3. Маслеников С.П., Пастухов Н.А., Чеботарев А.В., Школьников Э.Я. Режимы работы источника ионов вакуумных нейтронных трубок нейтронных генераторов. — В сб.: Межд. научно-технич. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе», 2013, с. 141—146.

Поступила в Редакцию 15.01.15

УДК 621.039.58

ВЛИЯНИЕ НУКЛЕАЦИИ НА ПОВЕДЕНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ВВЭР

Сорокин А.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

Моделирование динамики аэрозолей продуктов деления в первом контуре ВВЭР при тяжелой аварии с разгерметизацией твэлов является необходимым условием для оценки последствий их выхода за пределы корпуса реактора и радиоактивного загрязнения окружающей среды [1, 2]. Аэрозоли размером 1 нм образуются в результате нуклеации паров продуктов деления, оксидов урана и материалов конструкций реактора при достижении соответствующих термодинамических условий [2, 3]. Коагуляция и конденсация пара являются основными механизмами дальнейшего роста частиц до размера ~1 мкм [2].

В кодах ASTEC (Франция) и AERMOD (Россия) нуклеация учитывается при моделировании динамики аэрозолей в первом контуре [4, 5]. В кодах MELCOR (США) и СОКРАТ (Россия) этот механизм не рассматривается, а образование частиц моделируется как мгновенный равновесный фазовый переход в субмикронные частицы с априори заданным размером 100—300 нм [6]. При этом предполагается, что нет необходимости учитывать стадию роста наночастиц вследствие сравнительно малого времени ее реализации при циркуляции смеси паров продуктов деления и газа теплоносителя в первом контуре.

Целью настоящей статьи является сравнение расчетного переноса и осаждения продуктов деления с учетом и без учета нуклеации с экспериментальным [7, 8]. В эксперименте FPT1 RNEBUS исследовали образование и перенос аэрозолей продуктов деления и материалов конструкций реактора в имитаторе первого контура и защитной оболочке в условиях, характерных для протекания тяжелой аварии с разгерметизацией твэлов ВВЭР и выходом продуктов деления в газовый поток теплоносителя — перегретый водяной пар.

Модель и исходные данные для расчета. Расчеты проводили с помощью программного модуля AERMOD [5], который позволяет рассматривать аэрозоли произвольного размера с учетом их многокомпонентного состава и зависимости коэффициентов коагуляции и осаждения от размера и массы частиц. Многокомпонентная конденсация паров на частицах и поверхности учитывается в кинетическом приближении с учетом зависимости равновесной концентрации паров от состава и размера частиц (эффект Кельвина). Образование аэрозолей рассматривается на основе классической теории нуклеации. Компонентный состав частиц определяется динамикой аэрозольных процессов. При этом состав частиц разного размера

может различаться, т.е. не является средним по частицам всех размеров, как, например, в коде MELCOR. Аэрозоли образуются в результате нуклеации паров продуктов деления, материалов конструкций реактора и оксидов уранового топлива. Доминирующим механизмом их дальнейшего роста является коагуляция. Основными механизмами выхода продуктов деления из объема теплоносителя являются осаждение частиц и конденсация пара на поверхность элементов конструкций первого контура. Как следствие, на поверхности образуется слой отложений.

Аэрозольные процессы моделируются в отдельной пространственной ячейке, соответствующей нодализационной схеме первого контура. Структура ячеек является общей для модулей теплогидравлики и динамики аэрозолей. Предполагается, что в ячейке выполняется условие гомогенного смешения в среднем для всех компонентов газовой среды.

Исходные данные для расчета эксперимента FPT1 взяты из работ [7—9]. Рабочую часть экспериментальной установки моделировали как одномерную последовательность контрольных объемов — цилиндров, геометрия и температура поверхности которых приведены в табл. 1. В расчетах выход продуктов деления из твэлов и химические процессы в газовой фазе не рассматривали. Выход продуктов деления моделировали заданием постоянных массовых источников всех компонентов в первую ячейку — имитатор верхней камеры смешения реактора, источники определяли в соответствии с экспериментальными данными [7—9] (табл. 2). Состав газовой среды — водяной пар, начальная температура 2000 К, давление в контуре $2,6 \cdot 10^5$ Па. Общая длина имитатора первого контура 26,2 м. Переходный режим разогрева установки и твэлов в расчете не рассматривался. Время расчета — 100 мин от начала выхода продуктов деления из твэлов. Расчетное время пребывания смеси в контуре до имитатора защитной оболочки составляет 8 с [9].

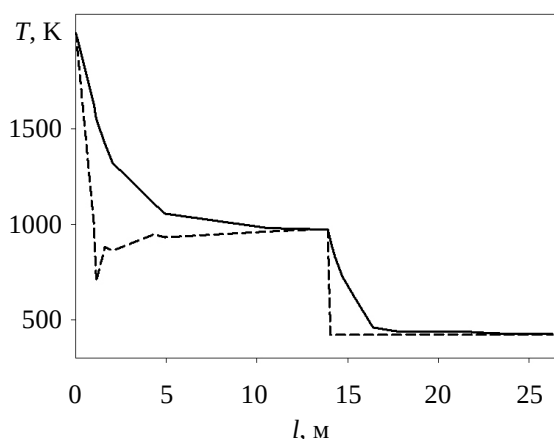
Результаты расчетов. Наличие резкого градиента распределения температуры газа и стен на начальном участке трубы связано с недостаточным подогревом вследствие конструктивных особенностей установки (рис. 1).

Таблица 1. Нодализационная схема для расчета эксперимента FPT1

Номер ячейки	Направление потока газа	Ячейка		
		длина, м	диаметр, м	температура стен, К
1	Вверх	1	0,0716	1500
2		0,13	0,0746	700
3		0,48	0,062	860
4		0,41	0,048	880
5		2,28	0,04	940
6	Горизонтальное	0,62	0,03	940
7		5,56	0,03	960
8		2,18	0,03	970
9		0,45	0,03	970
10		0,69	0,025	970
11	Вверх	0,15	0,02	423
12		0,25	0,02	423
13		0,4	0,02	423
14		0,7	0,02	423
15		0,5	0,02	423
16	Горизонтальное	0,5	0,02	423
17		0,59	0,02	423
18		0,59	0,02	423
19		0,31	0,02	423
20		0,92	0,02	423
21	Вниз	0,92	0,02	423
22		0,92	0,02	423
23		0,92	0,02	423
24		0,92	0,02	423
25		1,08	0,025	423
26	Горизонтальное	0,8	0,03	423
		2,8	0,044	423

Таблица 2. Данные для источников массы компонентов в эксперименте FPT1

Компонент	Источник, кг/с
H ₂ O	$2 \cdot 10^{-3}$
CsI	$3,5 \cdot 10^{-7}$
CsOH	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Cs ₂ MoO ₄	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Cs	$6 \cdot 10^{-8}$
MoO ₃	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Te	$3,5 \cdot 10^{-7}$
Ba	$3,4 \cdot 10^{-8}$
Sn	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Ag	$1,2 \cdot 10^{-5}$
In	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Cd	$1 \cdot 10^{-7}$
CdOH	$4 \cdot 10^{-6}$
Re	$6 \cdot 10^{-6}$
U ₃ O ₈	$2,6 \cdot 10^{-6}$



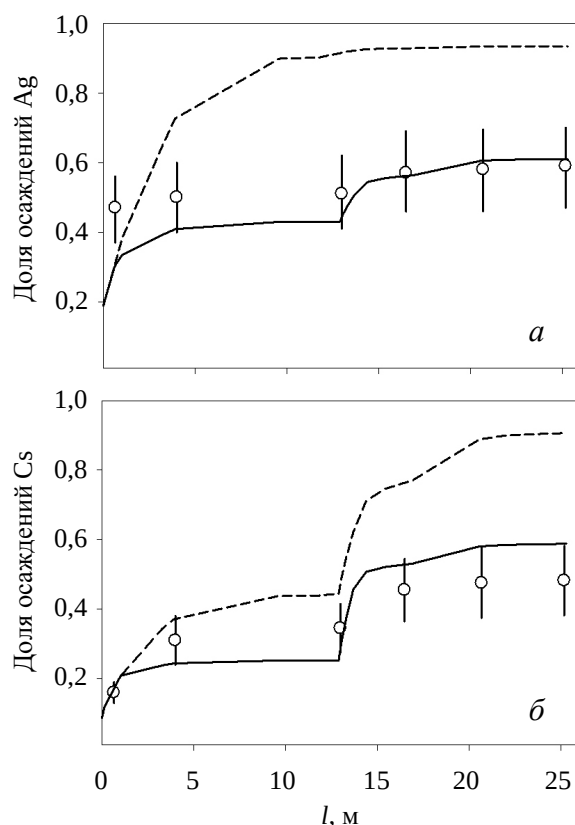
Р и с. 1. Распределение температуры газа (—) и поверхности стен (- - -) первого контура

Наибольшая разница температуры газа и поверхности стен наблюдается на вертикальных участках горячей линии и парогенератора. Соответственно в этих областях следует ожидать интенсивное осаждение аэрозолей на поверхность вследствие градиента температуры (механизм термофореза [2, 5]).

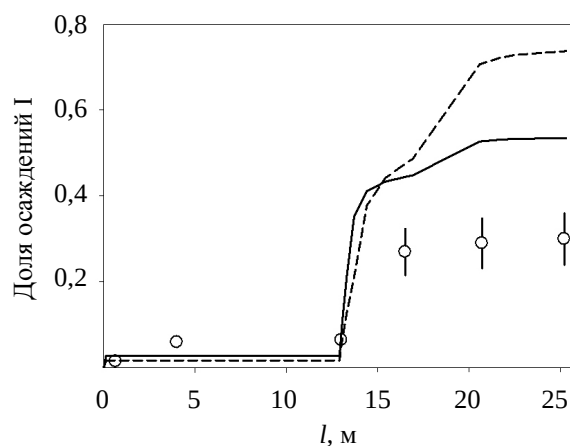
Расчетное осаждение серебра и цезия для модели с учетом нуклеации согласуется с экспериментальным по длине первого контура (рис. 2). Расчеты для модели без нуклеации и с заданным источником частиц нелетучих компонентов размером 100 нм, как в кодах MELCOR и СОКРАТ, заметно отличаются от эксперимента. Это связано с завышенной скоростью конденсации соединений цезия из паровой фазы на поверхность стен на начальном участке, а также осаждения на поверхность аэрозолей, содержащих серебро на участке подъемного течения парогенератора.

Важно отметить, что при аналогичном сравнении расчетная интенсивность осаждения иода по длине контура заметно превышает экспериментальную на участке парогенератора и холодной линии (рис. 3). Это можно объяснить тем, что в расчетах рассматривается только одно соединение иода CsI и не учитываются образование и химическая кинетика таких компонентов, как HI , AgI , CdI , InI . Аналогичные выводы приводятся в работах [7—9].

Приведенные результаты показывают важность учета нуклеации и кинетики химических реакций в газовой фазе при моделировании переноса паров и аэрозолей продуктов деления в



Р и с. 2. Эффективность осаждения серебра (а) и цезия (б) по длине первого контура: $\circ$ — эксперимент; —, --- — расчет для модели с учетом нуклеации и заданным источником частиц нелетучих компонентов размером 100 нм соответственно



Р и с. 3. Эффективность осаждения иода (обозначения кривых см. на рис. 2)

первом контуре. Равновесное приближение при консервативном задании начального размера аэрозолей без учета конкретных термодинамических условий может приводить к заметному отличию расчетных результатов от экспериментальных при осаждении продуктов деления в первом контуре. Как следствие, это приведет к

неточному моделированию источника радиоактивных компонентов при оценке последствий тяжелой аварии.

Рассмотренный эксперимент является характерным для случая эмиссии паров продуктов деления из поврежденных твэлов в каналы первого контура при тяжелой аварии. При смешении паров с более холодным газом-теплоносителем (пары воды для ВВЭР) формируются условия для образования аэрозолей продуктов деления. Потенциально этот процесс может начаться уже на выходе из активной зоны реактора. При этом образуется множество мельчайших частиц размером несколько нанометров. Поэтому представляется важным включение нуклеации, гомогенной и на ионах, в модель образования радиоактивных аэрозолей интегральных кодов для достоверного моделирования их дисперсных характеристик и состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спассков В.П., Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б. и др. Расчетное обоснование теплогидравлических характеристик реактора ВВЭР. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004.
2. Williams M., Loyalka S. Aerosol Science: Theory and Practice with Special Applications to the Nuclear Industry. London: Pergamon Press, 1991.
3. Kissane M. On the nature of aerosols produced during a severe accident of a water-cooled nuclear reactor. — Nucl. Engng Design, 2008, v. 238, p. 2792—2800.
4. ASTEC SOPHAEROS Module. Theoretical Manual. Ed. F. Cousin. DPAM-SEMIC-181, 2009.
5. Сорокин А.А. Моделирование динамики аэрозолей продуктов деления в первом контуре. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 3, с. 162—167.
6. Summers R. MELCOR 1.8.0. A Computer Code for Nuclear Reactor Severe Accident Source Term and Risk Assessment Analysis. NUREG/CR-5531, Sandia National Laboratories, 1991.
7. Kissane M., Drosik I. Interpretation of fission product transport behaviour in the Phebus FPT0 and FPT1 tests. — Nucl. Engng Design, 2006, v. 236, p. 1210—1223.
8. Haste T., Payot F., Bottomley P. Transport and deposition in the Phebus FP circuit. — Ann. Nucl. Energy, 2013, v. 61, p. 102—121.
9. Xerry B., Canneaux S., Louis F. e.a. Ab initio calculations and iodine kinetic modeling in the reactor coolant system of a pressure water reactor in case of severe nuclear accident. — Computational and Theoretical Chemistry, 2012, v. 990, p. 194—208.

Поступила в Редакцию 02.02.15

УДК 621.039.58

ОРГАНИЗАЦИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ БЕЛОРУССКОЙ АЭС

*Брюхань Ф.Ф., Виноградов А.Ю. (ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Новгородская обл.),
Лаврусевич А.А. (МГСУ, г. Москва)*

Обеспечение радиационной безопасности объектов использования атомной энергии, в том числе АЭС предусматривает организацию комплексного мониторинга параметров окружающей среды в районе их размещения [1—3]. Среди компонентов комплексного мониторинга значительная роль принадлежит гидрометеорологическому мониторингу, предусматривающему регистрацию, архивацию и анализ изменений во времени основных параметров состояния водной и воздушной сред в зонах воздействия объектов использования атомной энергии. Эти параметры во многом определяют их радиационную и экологическую безопасность на всех этапах жизненного цикла [4]. Кроме того, мони-

торинг водной среды важен при контроле достаточности водных ресурсов для водоснабжения АЭС.

Гидрометеорологический мониторинг в районе размещения Белорусской АЭС планируется функционально включить до ввода АЭС в эксплуатацию в разрабатываемую автоматизированную систему контроля радиационной обстановки. Система гидрометеорологического мониторинга разрабатывается с учетом особенностей проекта АЭС и природно-техногенных условий площадки ее размещения. При этом мониторинг выполняется для всех стадий жизненного цикла — от строительства до вывода из эксплуатации.