

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО РЕАКТОРА PNEBUS

А.А. Брызгалов*, А.А. Наталенко*, Ф. Де Роза, С. Тирины**,
Н. Вукелату****

**Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,*

***Italian National Agency for New Technology, Energy and the Environment*



С помощью программного комплекса ASTEC v1.3rev2 была смоделирована тяжелая авария с расплавлением активной зоны, реализованная в интегральном тесте PNEBUS FPT1. Рассмотрены случаи полного последовательного моделирования тяжелой аварии с расплавлением активной зоны и автономного использования модуля CPA, предназначенного для расчета теплогидравлических параметров непосредственно в защитной оболочке на основе экспериментальных данных. Произведен анализ чувствительности основных теплогидравлических параметров к входным значениям потоков пара и водорода в пределах неопределенностей экспериментальных данных. Изучено влияние различных вариантов построения геометрической модели защитной оболочки на рассчитываемые величины. Найдены общие закономерности поведения основных теплогидравлических величин и указаны вероятные причины расхождений в предсказаниях программы и результатах эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

После известных аварий в Три Майл Айленд и Чернобыле со стороны общественности повышенное внимание уделяется безопасности АЭС. Безусловно, проводимые эксперименты и разработка программных комплексов позволяют достичь более высокого уровня развития в этом направлении. В данной работе была проведена верификация программного комплекса ASTEC [1] на основе эксперимента PNEBUS FPT1 [2], а именно, проверялась точность воспроизведения теплогидравлических процессов в контейнменте реактора PNEBUS.

Моделирование тяжелых аварий легководных реакторов является одной из задач программного комплекса ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code), разрабатываемого Институтом радиационной защиты и ядерной безопасности (French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN), Франция, совместно с Обществом по безопасности ядерных установок и реакторов (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)), Германия. ASTEC – это модульная система, каждый модуль которой ответственен за описание особых физических (а иногда и химических) процессов в конкретных частях реактора. В данной работе особое

© А.А. Брызгалов, А.А. Наталенко, Ф. Де Роза, С. Тирины, Н. Вукелату, 2008

внимание уделено теплогидравлике в контейнменте. Естественно, не всегда имеет смысл использовать весь комплекс, иногда удобно пользоваться отдельным модулем. ASTEC предлагает такую возможность.

Последней версией на текущий момент является версия ASTEC V1.3rev2, выпущенная в декабре 2007 г., однако программу продолжают усовершенствовать.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РЕАКТОР PNEBUS

Верификация программного комплекса ASTEC проводилась на основе экспериментальных данных интегрального теста PNEBUS FTP1. PNEBUS представляет собой реактор петлевого типа с тепловой мощностью 20 МВт. Активная зона загружается слабообогащенным урановым топливом, в качестве замедлителя и теплоносителя используется вода. Экспериментальный стенд моделирует реактор с водой под давлением тепловой мощностью 900 МВт в масштабе 1/5000. FTP1 (Fission product test) моделирует тяжелую аварию с расплавлением активной зоны. Основное назначение этого эксперимента – изучение накопления и поведения продуктов деления и других материалов, выделяющихся в процессе разрушения активной зоны [3]. Контейнмент реактора PNEBUS представляет собой стальной цилиндр объемом 10 кубических метров. Основание цилиндра является полусферическим и в центре имеет отверстие диаметром 600 мм для стока конденсата в водосборник. В верхней части располагаются 3 конденсатора. Каждый состоит из сухой части (температура 120°C) и влажной (температура 90°C).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для объединенных расчетов использовался базовый input-файл (W. Plumescocq IRSN/DRS/SEMAR/LEPF (2002)), распространяемый совместно с кодом ASTEC. Данные, используемые в отдельных вычислениях CPA-модуля (температура, давление, массовые потоки пара и водорода), были взяты из эксперимента. Кроме того, использовалось стандартное описание геометрии с пятью контролируемыми объемами: водосборник, цилиндрическая часть контейнмента, сухой конденсатор, влажный конденсатор и особая промежуточная зона между водосборником и контейнментом. Каждая зона содержит одну тепловую конструкцию (стенку). Все стенки имеют прямоугольную геометрию (рис. 1).

Входные экспериментальные данные сравнивались с обобщенным расчетом ASTEC (модуль CESAR). Разница для массовых потоков водорода и пара достигает 19 и 34% соответственно. Кроме того, как известно из эксперимента, существует неопределенность для этих величин в пределах 14%. Таким образом, мы имеем заниженную, среднюю и завышенную оценки для этих входных параметров. Анализ чувствительности выявил сильное влияние на итоговые данные выбора конкретной оценки.

Данные для входных потоков продуктов деления и других материалов оценивались на основе обобщения экспериментальных значений. В FPT1-эксперименте использовались два метода детектирования элементов: PTA – post test approach и CECILE – γ -спектрометрия. Данные брались в холодной нитке контура. Итак, материалы, принятые во внимание:

- продукты деления Sb, Te, Ru, Ba, I (CECILE γ -спектрометрия), Cs, Mo, Tc, Rb (PTA);
- материалы стержней управления, сборки, тепловыделяющие и конструкционные материалы U, Ag, Id, Cd, Sn, Re (PTA);
- инертные газы Xe, Kr (CECILE γ -спектрометрия).

Все эти элементы за исключением благородных газов рассматривались в аэрозольной форме. Моделировался один аэрозольный компонент со специфическими свойствами:

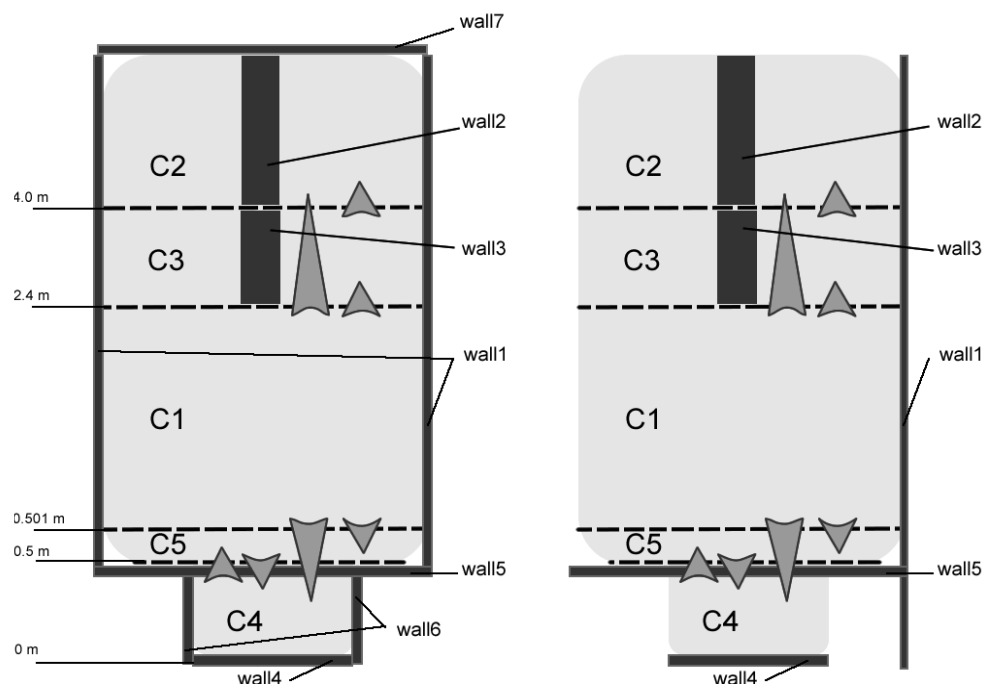


Рис. 1. Сравнение двух вариантов описания геометрии контейнента (слева – «сложный вариант», справа – «простой»: C1 – основная часть контейнента, C2 – влажный конденсатор, C3 – сухой конденсатор, C4 – водосборник, C5 – вспомогательная зона. Показаны абсолютные высоты границ между зонами, схема связей (серые треугольники) и тепловые конструкции (wall1, wall2 и так далее)

- молекулярный вес аэрозольного компонента 168 кг/кмоль;
- фактор Вант Гоффа 1.9;
- скорость осаждения аэрозоля 10^{-3} м/с;
- исходное распределения аэрозоля – логнормальное;
- среднее отклонение 1.9;
- отношение средней массы к медианному диаметру 2.79 мкм.

Входной массовый поток аэрозоля вычислялся как сумма полученных из эксперимента массовых потоков продуктов деления и материалов (табл. 1), за исключением инертных газов.

Таблица 1

Входной массовый поток аэрозоля

Время, с	Скорость массового потока, кг/с
11190	0.0000E-00
11200	1.5815E-05
13960	8.1870E-06
16800	5.3888E-05
17094	2.2062E-05
17100	0.0000E-00

ТЕПЛОГИДРАВЛИКА

Давление

Сравнение экспериментальных данных с обобщенными расчетами выявило существенное расхождение после 4000 с (рис. 2). В период от 4000 до 10000 с эта разница составляла около 2% в среднем, затем от 10000 до 18000 с – 3,5%. Для моментов времени от 11000 до 15000 с найдена максимальная разница в 4% или в 0.01 МПа. Результаты отдельного расчета модулем CPA со средними входными потоками пара и водорода примерно на 2% хуже по сравнению с результатами обобщенного расчета (с 13000 по 18000 с). Соответственно, при рассмотрении заниженных и завышенных входных потоков пара и водорода была выявлена разница в 3–4% по отношению к среднему потоку в пределах 12000 и 18000 с. Естественно, что лучшим является случай заниженного входного потока пара и водо-

рода. Средняя ошибка для давления не превышает 1,5% по сравнению с экспериментом. Но дальше будет показано, что этот вариант входных данных не является оптимальным для других теплогидравлических величин, таких как относительная влажность или скорость конденсации.

Относительная влажность

Результаты обобщенных расчетов и CPA-расчетов (для средних входных потоков) в целом схожи (рис. 2). В обоих случаях мы имеем заниженную оценку относительной влажности в течение всего времени. Эти результаты на 5–13% отличаются от экспериментальных значений. Данные, полученные для заниженного и завышенного входных потоков пара и водорода на 3–5% отличаются от результатов для среднего потока в пределах 12000–18000 с. В частности, если используется завышенный входной массовый поток для пара и водорода, мы имеем наилучшие результаты – полностью противоположная картина той, что была для давления. В период времени до 9000 с относительная влажность не зависит от выбора потока. Также отметим, что относительная

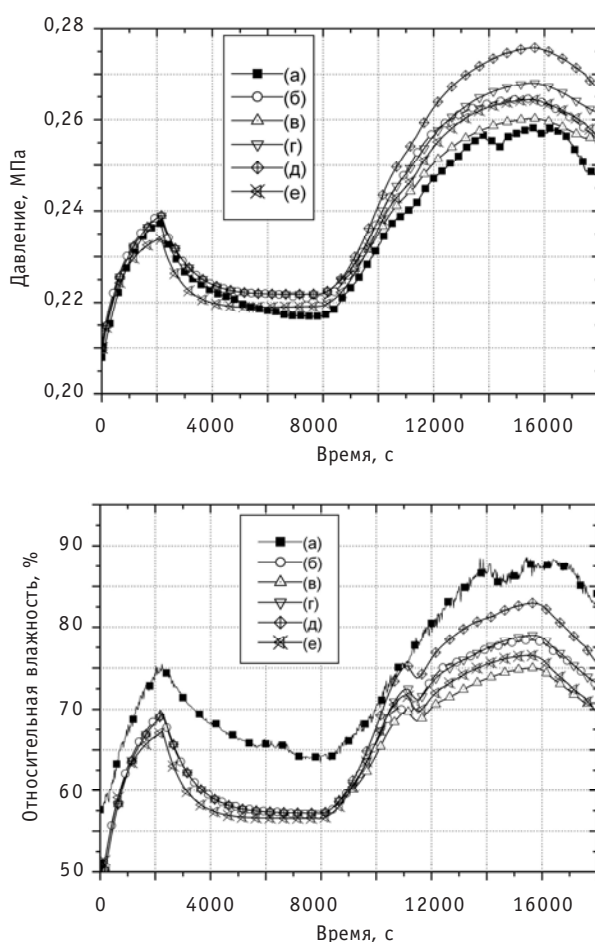


Рис. 2. Давление газовой смеси в контейнменте как функция времени (слева) и средняя относительная влажность в контейнменте как функция времени (справа).

Легенда: (а) – эксперимент FTP1; (б) – ASTEC V1.3rev2, объединенный расчет; (в) – ASTEC V1.3rev2, CPA, заниженные потоки пара и водорода; (г) – ASTEC V1.3rev2, CPA, средние потоки пара и водорода; (д) – ASTEC V1.3rev2, CPA, завышенные потоки пара и водорода; (е) – ASTEC V1.3rev2, CPA, измененная геометрия

влажность – это величина, наименее точно воспроизводимая ASTEC V1.3rev2 по отношению к эксперименту.

Температура

Максимальная разница составляет всего лишь 0,2 К для периода 8500–18000 с при различных входных потоках (рис. 3). До 8500 с температура не зависит от входных потоков пара и водорода. Сравнение обобщенных вычислений и отдельных модулем CPA (со средними потоками) приводит к похожим выводам: заметное отличие появляется после 8500 с и не превышает 0,2 К. Мы имеем разницу в 1 К во время периода калибровки при сравнении с результатами эксперимента FPT1. В последующее время данные теста имеют осцилляции шириной в 0,7 К и разницу между экспериментом FPT1 и результатами вычислений ASTEC только 0,3–0,5 К. Наилучшие результаты в период после 8000 с были получены для завышенного входного потока. Следует отметить, что температурная зависимость гораздо лучше описывается кодом ASTEC, чем, например, давление или относительная влажность. Ошибка не превышает 0,1%.

Скорость конденсации

Отметим, что для экспериментальной кривой есть некоторые осцилляции скорости конденсации в пределах 0,2 г/с (рис. 3). Принимая во внимание это обстоятельство, можно заключить, что экспериментальные данные и результаты обобщенного расчета ASTEC совпадают. Если сравнивать обобщенный расчет с вычислениями отдельно CPA-модуля, то результаты близки за исключением временного интервала от 10500–11500 с. В этой области CPA-расчет делает переоценку в 0,2 г (для среднего входного потока). Случаи заниженного и завышенного входных потоков дают переоценку и недооценку эксперимента соответственно (9000–18000 с). Разница в пределах 0,27 г/с. И наконец, мы отмечаем, что среди всех теплогидравлических величин скорость конденсации описывается наилучшим образом.

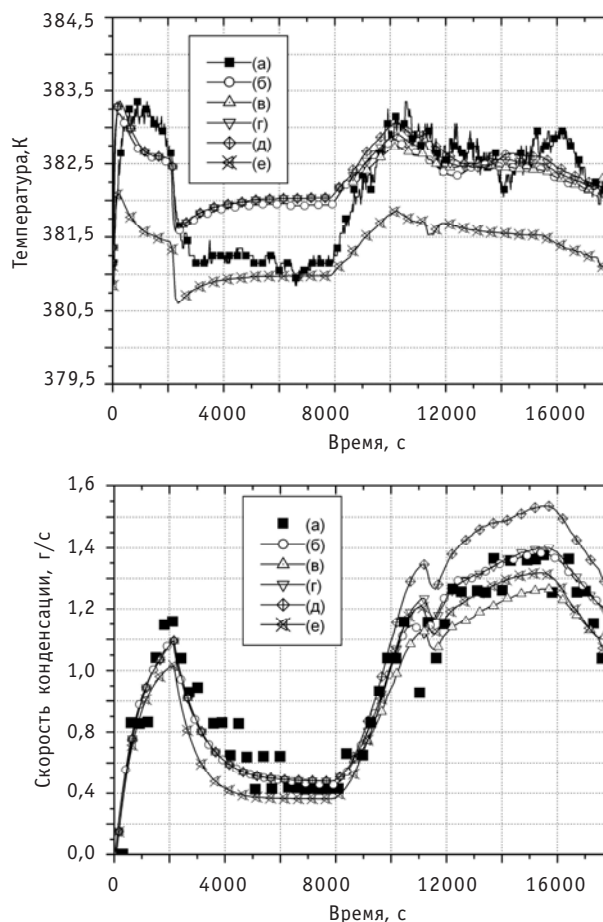


Рис. 3. Средняя температура газовой смеси в контейнменте как функция времени (слева) и скорость конденсации пара на конденсаторах как функция времени (справа).
 Легенда: (а) – эксперимент FPT1; (б) – ASTEC V1.3rev2, обобщенный расчет; (в) – ASTEC V1.3rev2, CPA, заниженные потоки пара и водорода; (г) – ASTEC V1.3rev2, CPA, средние потоки пара и водорода; (д) – ASTEC V1.3rev2, CPA, завышенные потоки пара и водорода; (е) – ASTEC V1.3rev2, CPA, измененная геометрия

Общие замечания относительно влияния неопределенностей во входных значениях потоков водорода и пара на неопределенности в основных теплогидравлических характеристиках представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние неопределенностей во входных значениях потоков водорода и пара

Неопределенность в значениях входных потоков водорода и пара	Неопределенность (относительно оценки со средними значениями входных потоков водорода и пара) основных теплогидравлических величин			
	Давление	Относительная влажность	Температура	Скорость конденсации
14%	3 – 4%	3 – 5%	<<1%	10 – 14%

СРАВНЕНИЕ ПРОСТОГО И СЛОЖНОГО СЛУЧАЕВ ВЫБОРА ГЕОМЕТРИИ КОНТАЙНМЕНТА ПО ОТНОШЕНИЮ К ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Данная часть посвящена построению нового геометрического описания для REPF 502 защитной оболочки для CPA-модуля ASTEC V1.3rev2. Целью являлось создание реалистичной модели, т.к. input-файл, распространяемый с кодом ASTEC, содержит наипростейшее описание геометрии. К примеру, все объекты «heat structures» или «стенки» являются в таком описании прямоугольными (для вертикальных структур, к примеру, пространство слева от стенки считается внутренним пространством исследуемого объекта, а пространство справа – окружающей средой). Существуют также и другие значительные упрощения. Поэтому данное сравнение базовой модели с более усложненным вариантом, несомненно, важно. Что и было сделано.

Выделим три основных объекта кода, которые затронули изменения по отношению к базовому случаю:

- соединения (Junctions);
- структура контрольных объемов (Zone structure);
- конструкции или «стенки» (Wall structure).

На рис. 1 представлена схема построения исследуемых моделей геометрии, включающая в себя данные объекты. Визуально рисунок отражает различие только в тепловых конструкциях (в простой схеме 5 стенок, в сложной – 7), однако далее будут показаны более детальные различия в схемах.

Для простоты мы будем использовать упрощенные названия: *простые* и *сложные* модели, случаи и так далее.

Моделирование связей

Схематичный вид связей (соединений) представлен на рис. 1.

В табл. 3 представлены два основных параметра, касающиеся связей:

- LEN – длина связи в метрах;
- SECT – площадь поперечного сечения в метрах.

Мы руководствовались следующей рекомендацией при определении данных параметров в сложной геометрии (исключая C4–C5- и C5–C4-соединения):

«В случае виртуального разделения на контрольные объемы в качестве поперечного сечения выбирается полная площадь взаимодействующей поверхности, а в качестве длины – расстояние между центрами зон...» [4, с. 32].

C4–C5- и C5–C4-соединения имеют идентичные параметры, используемые в про-

Таблица 3

LEN- и SECT-параметры

Соединение	Простая геометрия, LEN, м	Сложная геометрия, LEN, м	Простая геометрия, SECT, м ²	Сложная геометрия, SECT, м ²
C1–C2	0,5	2,4	1,0	2,36
C1–C3	0,5	0,8	1,0	1,18
C1–C4	0,5	1,5	1,0	0,27
C1–C5	0,5	0,0005	1,0	2,19
C2–C3	0,5	1,6	1,0	1,18
C4–C5	0,5	0,5	0,5	0,5
C5–C4	0,5	0,5	0,5	0,5

стом случае. Оставшиеся элементы описания связей (*ZETB* и *ZETE*) также были сохранены.

Зоны (контрольные объемы)

Структура контрольных объемов может также быть выбрана различным образом. *SELE* – абсолютная высота нижней части контролируемого объема в метрах (рис. 2). Таким образом, этот параметр определяет разбиение по высоте контейнента на зоны. Наибольший интерес представляет вариант удаления двух верхних узлов, при этом мы получаем так называемую 3-зонную модель. Вместо C2-, C3-контрольных объемов, содержащих конденсаторы, мы имеем одну зону C1, включающую в себя весь контейнент. В то время как зоны C4 (водосборник) и C5 (дополнительный контрольный объем) остаются неизменными. Безусловно, такой вариант удаления нескольких узлов возможен только в случае виртуальных связей.

Проделанный анализ не показал существенной разницы в результатах для случая пяти и трех зон. Важен другой контекст, связанный с выходными данными. В частности, с точки зрения учета поведения аэрозоля (результаты такого расчета не приводятся в данной статье) 5-зонная модель более предпочтительна, поскольку мы имеем возможность контролировать все необходимые выходные значения, включая осаждение частиц на конденсаторе и стенках контейнента. В 3-зонной модели получаем только суммарное значение этих параметров. Собственно, по этой причине мы использовали 5-зонную модель в своих расчетах, как это и было в базовом случае. Но мы еще раз подчеркиваем этот интересный результат: отсутствие существенной разницы между использованием 5 и 3 зон для конечного результата.

Также предлагается случай, где сохраняется лишь один контрольный объем, при этом не нужно использовать вообще никаких связей. Однако проблема, связанная с выходными данными, в этом случае также остается.

Стенки (тепловые структуры)

Усложненное моделирование корпуса защитной оболочки в наибольшей степени повлияло на результаты вычислений CРА-модуля. На рис. 1 непосредственно можно видеть схемы двух предлагаемых моделей, а более детальная информация содержится в табл. 4.

В случае простой геометрии *wall 1* (оболочка контейнента) содержит стенку водосборника (рис. 1). Мы полагаем, что это очень грубое приближение, поскольку

Таблица 4

Тип симметрии стенок и параметр AREA

wall	Простая геометрия	Сложная геометрия	Простой случай, параметр AREA, м ²	Сложный случай, параметр AREA, м ²
1	Прямоугольная	Цилиндрическая	25,991	25,011
2	Прямоугольная	Цилиндрическая	0,268	0,268
3	Прямоугольная	Цилиндрическая	2,3497	2,252
4	Прямоугольная	Прямоугольная	1,184	1,105
5	Прямоугольная	Прямоугольная	2,2	2,2
6	...	Цилиндрическая	...	0,917
7	...	Прямоугольная	...	2,46

ку данные конструкции имеют различные температуры (110 и 90°C соответственно). Кроме того, в модели отсутствует «крышка» контейнента. В сложном варианте такие неточности устранены.

Перейдем к рассмотрению параметра AREA. AREA – площадь поверхности стенки (прямоугольного типа) в квадратных метрах. Для цилиндрической симметрии этот параметр не используется. Вместо AREA применяются RADI (внутренний радиус конструкции цилиндрического типа в метрах) и HEIG (высота цилиндрической конструкции в метрах). Таким образом, в табл. 3 для стенок цилиндрического типа представлены величины, аналогичные параметру AREA и вычисленные через RADI-и HEIG-параметры.

Еще одно замечание касается следующего аспекта. Площадь стенки wall 1 (случай простой геометрии) равна сумме площадей поверхностей стенок wall 1 и wall 6 (случай сложной геометрии). Это сделано для сохранения реальных значений площади боковой оболочки контейнента (около 25 м²), которые известны из описания эксперимента.

Итак, подведем итог: во-первых, две новые стенки были добавлены (wall 6 – боковая стенка водосборника и wall 7 – крышка контейнента) и соответственно боковая оболочка контейнента была уменьшена (wall 1); во-вторых, для конструкций walls 1,2,3,6 использовался цилиндрический тип геометрии. Оставшиеся параметры были выбраны схожими в обоих рассматриваемых случаях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы получили две модели, различные по содержанию. Есть еще одна деталь, о которой пока ничего не говорилось, – это входные потоки водорода и пара (параметры, передаваемые из предварительного расчета). Анализ чувствительности этих величин можно посмотреть в предыдущей части. В обоих случаях (простом и сложном) мы использовали такие входные потоки, которым соответствуют наилучшие выходные данные. Для варианта сложной геометрии – это завышенные входные потоки пара и водорода, а для варианта простой геометрии – усредненный поток.

Итоговая информация о моделях содержится в табл. 5.

На рис. 3,4 представлены результаты для теплогидравлических характеристик. Можно отметить, что с точки зрения баланса давление–влажность, несомненно, выгоднее применять случай простой геометрии.

Таблица 5

Используемые параметры в простой и сложной модели

Параметр	Простой случай	Сложный случай
Входной поток	Средний	Завышенный
Число зон	5	5
Число стенок	5	7
Доминирующая геометрия	Прямоугольная	Цилиндрическая
Общий объем всех зон	10 м ³	10 м ³
Соединения	Идентичные	Различные

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теплогидравлические характеристики рассчитываются с большой точностью в контейнменте:

- небольшое завышение пикового значения общего давления;
- временная зависимость температуры хорошо воспроизводится после калибровочного периода; разница между вычисленным и измеренным значениями не превышает 1 К;
- величина относительной влажности недостаточно хорошо воспроизводится вычислениями;
- скорость конденсации предсказывается отлично.

Проведенный анализ чувствительности определил существенное влияние входных потоков пара и водорода на теплогидравлические характеристики. Но каких-либо существенных преимуществ использования того или иного варианта выявлено не было. Можно сказать, что полный расчет ASTEC дает наилучшие результаты для теплогидравлических характеристик FPT1-эксперимента.

Использование сложной геометрии предпочтительно для расчетов давления в контейнменте. Однако для других теплогидравлических характеристик результаты хуже либо близки к полученным для простого случая геометрии. Мы выделяем две основные входные геометрические характеристики, имеющие решающее значение: полный объем и площадь поверхности стенок. Обе являются фиксированными и варьированию не подлежат в рамках приводимого сравнения.

В заключение еще раз отметим, что ряд результатов, полученных как в [3], так и при проведении теплогидравлических расчетов, значительно расходятся с экспериментальными данными PHEBUS. Возникает необходимость сравнения результатов, полученных при помощи комплекса ASTEC, с результатами расчетов по другим программам, моделирующим последствия тяжелых аварий на АЭС, в частности речь идет о программах MELCOR [5], КУПОЛ-М [6,7] и КУПОЛ-А [8]. Такого рода расчеты являются одним из направлений дальнейшей работы авторов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают глубокую благодарность N. Girault (Н. Гираюльт), давшей ценные замечания и рекомендации при проведении расчетов.

Литература

1. Van Dorselaere J.P., et al. Evolution of the integral code ASTEC V1.3rev2 with respect to the V1.3rev0 version, ASTEC-V1/DOC/07-23, 2007.

2. *Von der Hardt P.* The Phebus-FP Project: Status Report 1989/90, CD-NA-12926, 1990.
3. *Брызгалов А.А. и др.* Использование программного комплекса ASTEC для моделирования поведения продуктов деления и других элементов, поступающих в систему охлаждения легководного реактора при тяжелой аварии // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. – № 4.
4. *Jacquemain, D., Bourdon S., et al.* PHEBUS FPT1 Final Report, IPSN/DRS/SEA/PEPF Report SEA1/00, IP/00/479, IPSN, 2000.
5. *Gauntt R.O., et al.* MELCOR Computer Code Manuals, SAND2001-0929, 2001.
6. *Зайцев А.А., Лукьянов А.А., Шаньгин Н.Н., Юрьев Ю.С.* Верификация кода КУПОЛ для расчета теплофизических процессов в контейнменте АЭС с ВВЭР/Сб. трудов отраслевой конференции «Теплогидравлические коды для энергетических реакторов» (Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 29-31 мая 2001.).
7. *Ефанов А.Д., Лукьянов А.А., Шаньгин Н.Н., Зайцев А.А., Безлепкин В.В., Семашко С.Е.* Верификация кода КУПОЛ-М по данным Международных стандартных задач // Теплоэнергетика. – 2004. – Т. 51. – № 2.
8. *Годизов А.Г., Лукьянов А.А., Шаньгин Н.Н., Попова Т.В., Супотницкая О.В.* Моделирование процессов выведения реакторных аэрозолей с использованием кода КУПОЛ/Сб. докладов IV Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, 23-26 мая 2005 г.).

Поступила в редакцию 30.06.2008

УДК 621.039.58

Thermohydraulics Simulation for PHEBUS Containment \A.A. Bryzgalov, A.A. Natalenko, F. De Rosa, S. Tirini, N. Voukelatou; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 10 pages, 5 tables, 3 illustrations. – References, 8 titles.

Verification and validation study of ASTEC code on the PHEBUS FPT1 experiment have been performed. The ASTEC coupled and the ASTEC CPA stand-alone containment calculations for the bundle degradation phase of experiment have been made. For the CPA stand-alone calculation the inlet steam and hydrogen flow rates sensitivity analyses has been made within the uncertainty of experimental data. Studying of the dependence between different geometry models of the containment and computational values was carried out. General patterns of the thermohydraulics behavior were found and probable reasons of discrepancies between ASTEC prediction and experimental results were noted.

УДК 621.039.534.63

Simple Formulas for Thermodynamic Properties of Sodium \A.A. Kazantsev, A.S. Kondratyev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 8 pages, 11 tables, 8 illustrations. – References, 5 titles.

As the coolant, sodium is widely used in the fast breeder reactors, but for its calculation with use of code OpenFOAM wider set of formulas, in comparison with published in reference books is required. For codes of computing hydrodynamics (CFD codes), such as OpenFOAM, by an Open Source license code there is possibility to change the source code text according to any applied problem, it was required to find or to obtain simple formulas for calculation thermo physics properties of sodium. Initial data for obtaining interpolation functions are taken from domestic and foreign handbook. The set of the calculated functions describing necessary for calculated codes thermodynamic and thermal physics properties of sodium and its steams, namely: dynamic viscosity, heat conductivity, superficial tension, thermal conductivity, heat of evaporation, pressure on saturation line from temperature, density on saturation line, Prandtl number on a saturation line were received.

УДК 621.039.5

Development of Thermal Hydraulic Code KANAL and Thermal Physics Models for NPP Simulators \A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 10 pages. – References, 24 titles.

For supporting of NPP simulators development there was performed the cycle of thermal physics and thermodynamic works, the set of models of main equipment, two phase non equilibrium code KANAL based on 6 equation model. The new flow map pattern was applied in the code and was used Russian correlation for bubble boiling and for condensation into tube, that is different from known code prototype, such as TRAC. For learning the TRAC code correlations there were performed accurate 3D transient calculations of some problems, including horizontal steam generator calculations, there was performed comparison of calculations with the experimental model of top quarter of tube bundle of horizontal steam generator.

УДК 621.039.548

Non-Stationary Hydrodynamic Loadings and Fuel Rods Beam Vibrations in Fuel Assembly WWER-440 \V.V. Perevezentsev, V.I. Solonin, F.D. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 9 pages, 5 illustrations. – References, 3 titles.

Are received by on a full-scale test model experimental data on flow-induced vibrations of a fuel rods beam in fuel assembly WWER-440. Essential influence of hydrodynamics of a stream before a basic lattice (on an input in a fuel rods beam) on intensity of vibrations is shown. On measurements of pulsations of pressure in a backlash between an internal surface a cover and an external series fuel rods the non-stationary hydrodynamic forces influencing a fuel rods beam and causing it of vibration are defined. The mechanical model of a fuel rods beam on the basis of its description as beams with low