

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТИННЫХ ОБЪЕМНЫХ ПАРСОДЕРЖАНИЙ ПО ВЫСОТЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА РБМК КОДОМ RELAP 5.

Брус Н.А. Юсупов О.Е.

Введение.

В настоящее время в России в научно-исследовательских и проектных организациях для анализа безопасности реакторов РБМК и ВВЭР широко используются RELAP5 и другие западные теплогидравлические коды улучшенной оценки. Все эти коды разрабатывались для зарубежных реакторов типа PWR и BWR. Реакторы типа РБМК не имеют аналогов в мире и отличаются спецификой теплогидравлических процессов. Особенности конструкции и теплогидравлики рабочего процесса в реакторе РБМК определяют необходимость валидации зарубежных кодов. Систематический характер работы по валидации кода RELAP5/MOD3.2 приобрели в рамках совместного российско-американского проекта МЦЯБ «Валидация программных средств применительно к ВВЭР и РБМК».

Для проведения валидационных расчетов были определены режимы и явления, которые могут иметь место при эксплуатации АЭС с РБМК и были перечислены экспериментальные установки на которых данные режимы и явления моделировались ранее либо могут моделироваться в будущем. В результате анализа имеющихся в России экспериментальных данных был определен перечень потенциальных стандартных проблем для валидации теплогидравлических кодов применительно к РБМК.

В данном докладе рассматривается валидационный анализ седьмой в предложенном списке валидационной задачи «Распределение объемных паросодержаний по высоте активной зоны технологического канала РБМК». Для РБМК эта величина важна в связи с положительным паровым коэффициентом реактивности.

1. Описание экспериментальной установки.

Эксперименты проводились на теплогидравлическом испытательном стенде БМ в НИКИЭТ в 70е годы. Стенд представляет собой модель контура многократной принудительной циркуляции реактора РБМК. Экспериментальный контур включает в себя модели двух технологических каналов реактора с нижними водяными и пароводяными коммуникациями (НВК и ПВК).

В зоне тепловыделения расположена электрообогреваемая модель ТВС которая состоит из 7 полномасштабных имитаторов твэл. Шесть имитаторов твэл располагались равномерно по окружности диаметром 32 мм, седьмой - в центре. Тепловыделение по длине имитаторов твэл равномерное. Такая конструкция ТВС отличается от натурной ТВС реактора, которая состоит из 18 твэлов и центрального необогреваемого стержня. В данном случае разработчики стенда использовали масштабную модель технологического канала.

При моделировании зоны тепловыделения технологического канала РБМК выполняются следующие принципы:

- соблюдается равенство относительных объемов теплоносителя приходящегося на 1 твэл ($0,045 \text{ м}^3$ и $0,044 \text{ м}^3$ для стенда и реактора соответственно);
- одинаковая с натурой тепловая мощность одного имитатора твэл;
- выдерживаются одинаковые с натурой (РБМК-1000) нивелирные отметки;

- гидравлические диаметры модели и прототипа близки между собой (7,84 мм гидравлический диаметр экспериментального канала стенда и 8,56 гидравлический диаметр канал реактора).

Высотный масштаб системы каналов: 1 : 1;

Объемный масштаб одного канала стенда по отношению к одному натурному каналу РБМК: 1 : 2,57.

Дистанционирующие решетки сотового типа (20 штук) располагались по высоте ЗТ с шагом 350 мм, что соответствует штатному расположению в канале РБМК 1000. Первая дистанционирующая решетка расположена на расстоянии 30мм от начало зоны тепловыделения.

Имитаторы ТВЭЛ выполнены из стальных трубок с наружным диаметром 13.5 мм, толщиной стенки 1.25 мм и длиной 7 м. Тепловыделение в имитаторах моделируется пропусканием через них электрического тока. Проточная часть ЗТ, в которой размещалась тепловыделяющая сборка (ТВС), образована набором талькохлоритовых втулок с внутренним диаметром 49 мм, которые устанавливались в металлическом корпусе (несущем давление), выполненный из трубы наружным диаметром 80 мм и толщиной стенки 5мм.

Данный эксперимент был использован для постановки верификационной задачи, поскольку, надежные данные по истинному объемному паросодержанию в полномасштабном ТК РБМК отсутствуют. В рассматриваемом эксперименте был задействован только один экспериментальный канал. Причем исследовалась только зона тепловыделения этого канала.

При исследовании распределения объемных паросодержаний в каждом эксперименте измерялось и записывались следующие режимные параметры:

- давление на выходе из зоны тепловыделения;
- расход через экспериментальный участок;
- температура теплоносителя на входе в обогреваемый канал;
- плотность теплоносителя;
- положение датчика плотности теплоносителя;
- электрическая мощность, подводимая к ТВС.

Плотность теплоносителя, осредненная по поперечному сечению экспериментального участка, измерялась бесконтактным датчиком. Этот датчик основан на методе измерения скорости регистрации замедленных водородосодержащей средой нейтронов от плутоний-бериллиевого источника быстрых нейтронов. Сигнал датчика обрабатывается электронным блоком с частотомером.

На стенде был установлен только один датчик плотности теплоносителя и поэтому для определения распределения объемных паросодержаний по длине обогреваемого канала с ТВС, нужно было менять положение этого датчика в стационарном режиме работы стенда. Система перемещения датчика вдоль экспериментального канала позволила фиксировать датчик в любом промежуточном сечении с погрешностью ± 2 мм. Для каждого стационарного состояния значение объемного паросодержания определялось в десяти точках по длине обогреваемого участка. Координаты сечений измерения были

следующие (отсчет снизу от начала активной зоны): 0,385, 0,948, 1,573, 2,322, 2,947, 4,010, 4,823, 5,448, 6,135, 6,760 метров, при общей длине активной зоны 7м.

Истинное объемное паросодержание вычислялось по формуле:

$$V = \frac{\rho_l - \rho_m}{\rho_l - \rho_v}$$

где ρ_l - плотность жидкой фазы теплоносителя в контролируемом сечении (определялась аналитически с использованием теплофизических свойств воды и измеренных в ходе эксперимента давления и температуры теплоносителя);

ρ_m - измеренная плотность теплоносителя;

ρ_v - плотность паровой фазы теплоносителя на линии насыщения (определялась аналитически с использованием теплофизических свойств воды на линии насыщения и измеренного в ходе эксперимента давления).

Для определения плотности недогретой жидкости использовались:

значение давления, замеренное на выходе из экспериментального участка, значение температуры жидкости T_i в исследуемом i -том сечении, которые рассчитывались.

Погрешности измеренных величин составили:

- массовая скорость - ± 2.08 кг/(м²•с);
- плотность теплового потока - ± 947 Вт/м²;
- истинное объемное паросодержание - ± 0.03
- положение датчика плотности теплоносителя ± 2 мм
- давление $\pm 1.5\%$;

2. Методика проведения эксперимента.

Эксперименты проводились при режимных параметрах, которые могут иметь место при эксплуатации РБМК (массовая скорость, плотность теплового потока, давления в сепараторе, температуры теплоносителя на входе в экспериментальный участок). При этом давление в контуре стенда соответствовало натурному давлению в КМПЦ РБМК, температура теплоносителя на входе в зону тепловыделения соответствовала реальной температуре в КМПЦ РБМК, а расход теплоносителя и тепловая нагрузка на ТВС пересчитывались из заданного объемно-мощностного масштаба для одного канала.

В стационарных режимах работы стенда при заданных значениях массового расхода через канал, тепловой мощности ТВС, температуры теплоносителя на входе в экспериментальный участок и давления на выходе из обогреваемого участка производилось определение среднего истинного объемного паросодержания в различных сечениях по высоте ТВС.

Эксперимент проводился следующим образом. Вначале устанавливался стационарный режим работы стенда при заданных значениях режимных параметров (массового расхода, тепловой нагрузки, давления в сепараторе, температуры теплоносителя на входе в экспериментальный участок). Затем датчик измерения плотности теплоносителя устанавливался поочередно в каждом из заданных сечений и производился замер средней

по сечению плотности теплоносителя. Время экспозиции в каждом измерении составляло 100с. В момент каждого из замеров измерялись и регистрировались массовый расход, тепловая нагрузка, давление на выходе из обогреваемого участка и температура теплоносителя на входе в экспериментальный участок. Данные параметры измерялись и фиксировались при каждом измерении плотности теплоносителя, так как в ходе эксперимента они не удерживались при строго фиксированных значениях. Затем эксперимент повторялся при новых значениях режимных параметров (массового расхода, тепловой нагрузки, давления в сепараторе, температуры теплоносителя на входе в экспериментальный участок).

Диапазон изменения режимных параметров стенда:

- давление: от 3.0 до 7 МПа;
- массовая скорость: от 500 до 2000 кг/(с м²);
- относительная энтальпия теплоносителя: от -0.64 до 0.5;
- плотность теплового потока: от 0.15 до 0.4 МВт/м²

что соответствует диапазону изменения режимных параметров натурального канала реактора:

- давление: от 3.0 до 7 МПа;
- массовый расход: от 1 до 4,6 кг/с;
- относительная энтальпия теплоносителя: от -0.64 до 0.5;
- тепловая мощность: от 0.8 до 2.2 МВт/м²

Эксперименты проводились в целях получения информации о распределении истинных объемных паросодержаний по высоте технологического канала РБМК в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Использование полученных экспериментальных данных при проведении валидационного анализа кодов, таких как RELAP5 позволит:

- Проверить модели и зависимости, используемые в кодах для описания межфазного трения;
- Проверить модели и зависимости, используемые в кодах для описания тепломассообмена между фазами;
- Проверить модели и корреляционные зависимости, используемые в кодах для описания процесса парообразования при кипении недогретой жидкости.

2. Валидационный анализ.

Решение валидационной задачи сводилось к численному моделированию предложенных стационарных режимов работы стенда и сравнении рассчитанных истинных объемных паросодержаний с экспериментальными.

При проведении валидационного анализа рассматривалась только зона тепловыделения одного экспериментального канала. В качестве граничного условия на входе задавались массовый расход и температура воды. В качестве граничного условия на выходе давление.

Нодализация схема представлена на рисунке. Граничные условия на входе в экспериментальный участок моделировались элементами типа time dependent volume и time dependent junction. Граничные условия на выходе из зоны тепловыделения моделировались элементами типа time dependent volume. Зона тепловыделения

моделировалась элементом типа “pipe” к которому подсоединялись две тепловые структуры. Одна тепловая структура моделировала ТВС, а другая стенку экспериментального канала. Тепловые потери в окружающую среду моделировались теплообменом между внешней поверхностью стенки канала и точкой с фиксированной температурой, соответствующей температуре окружающей среды (20°C). Гидравлический тракт зоны тепловыделения был разбит на 20 контрольных объемов. Длины контрольных объемов были подобраны таким образом, что дистанционирующие решетки находились на их границах.

Истинное объемное паросодержание изменялось в пределах от 0 до 0.96. Всего было рассчитано 25 экспериментальных режимов.

Результаты валидационного анализа показали хорошее согласование между экспериментальными и расчетными значениями истинных объемных паросодержаний в тех случаях, когда имеет место кипение в насыщенной жидкости. Согласно используемой в RELAP5 карте режимов течения, в валидационных расчетах моделировались следующие режимы:

- Bubbly (BBY);
- Slug (SLG);
- Annular mist (ANM).

При моделировании кипения в недогретой жидкости наблюдалось заметное рассогласование между результатами расчетов и экспериментальными данными. В эксперименте паровая фаза появляется раньше.

Это можно объяснить:

- а) погрешностями моделей и корреляционных зависимостей, используемых в RELAP5;
- б) неточностями при разработке расчетной модели;
- в) погрешностями проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных;
- г) неравномерным прогревом теплоносителя по сечению канала и по длине твэлов.

Для оценки влияния возможных погрешностей на полученные результаты были проведены следующие дополнительные расчеты.

а) Первоначально были проведены расчеты по анализу влияния на решение точности расчета межфазного трения. Были проведены дополнительные расчеты с различными гидравлическими диаметрами и гомогенной моделью течения потока. Было показано, что базовая модель обеспечивает наилучшее согласование с результатами расчетов.

- б) Заниженные (в сравнении с экспериментальными) значения расчетных истинных объемных паросодержаний при кипении в недогретой жидкости могут быть связаны с завышенными значениями коэффициентов теплоотдачи от имитаторов твэл в поток. Для оценки влияния точности определения коэффициента теплоотдачи при кипении в недогретой жидкости на результаты решения были выполнены расчеты при различных значениях коэффициента fouling factor (карата 1ccc801), который используется в корреляционных зависимостях (heat transfer correlation). В результате проведенного анализ для одного из режимов, в различных сечениях по высоте зоны тепловыделения были определены значения коэффициента fouling factor, которые позволяют улучшить согласование результатов расчетов с экспериментом.

Проведенный анализ показал, что одной из причин рассогласования между результатами расчетов и экспериментом в области кипения недогретой жидкости могут быть неточно определенные RELAP5 значения коэффициентов теплоотдачи. Сделать окончательное заключение о точности определения RELAP5 коэффициентов теплоотдачи нельзя, так как отсутствуют экспериментальные данные о температурах потока и температурах поверхности имитаторов ТВЭЛ в исследуемых сечениях.

в) Были выполнены дополнительные расчеты по оценке влияния величины тепловых потерь на распределение истинных объемных паросодержаний по высоте зоны тепловыделения. Анализировались следующие случаи теплообмена с окружающей средой:

- Теплоизоляционное покрытие на поверхности зоны тепловыделения отсутствует, тепловые потери в окружающую среду моделировались теплообменом между внешней поверхностью стенки канала и точкой с фиксированной температурой, коэффициент теплоотдачи $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- Тепловые потери в окружающую среду отсутствуют.

Из анализа расчетных графиков можно сделать вывод, что при высоких значениях истинных объемных паросодержаний тепловые потери не оказывают существенного влияния на результаты решения. При низких значениях истинных объемных паросодержаний тепловые потери оказывают более заметное влияние на результаты решения. Но даже в этом случае величины рассогласований между различными вариантами расчетов находятся в пределах погрешности определения величины истинного объемного паросодержания (± 0.03). Можно сделать вывод, что для рассмотренных в данной задаче режимов тепловые потери не оказывают существенного влияния на результаты решения, и проводить дополнительные работы по уточнению тепловых потерь не имеет смысла.

г) Неточности при расчете потерь давления на дистанционирующих решетках и потерь давления на трение в канале (wall friction) могут быть одной из возможных причин рассогласования между результатами расчетов и экспериментом. Были выполнены следующие варианты расчетов:

- расчеты с учетом всех возможных потерь давления;
- расчеты без учета потерь давления о стенки канала и без учета гидросопротивления дистанционирующих решеток.

Из анализа результатов проведенных расчетов можно сделать следующие выводы :

- При относительно высоких истинных объемных паросодержаниях точность расчета потерь давления в канале оказывает влияние на результаты расчетов, наилучшее согласование результатов расчетов с экспериментом имеет место при учете всех возможных потерь давления;
- При низких паросодержаниях точность расчета потерь давления в канале не оказывает заметного влияния на результаты решения.

д) При расчете значения истинного объемного паросодержания в исследуемом сечении использовалось давление измеренное не в этом сечении, а на выходе из зоны тепловыделения. Для оценки влияния расположения места замера давления на точность расчета истинного объемного паросодержания по измеренной плотности теплоносителя

были проведены дополнительные расчеты, в которых значения плотности теплоносителя непосредственно рассчитывались кодом RELAP5, а значения истинных объемных паросодержаний пересчитывались по методике использованной в эксперименте. Из анализа результатов проведенных расчетов можно сделать вывод, что используемый в эксперименте метод определения истинного объемного паросодержания по измеренным значениям плотности потока в заданном сечении и давления на выходе из зоны тепловыделения не вносит существенных искажений в точность определения величины истинного объемного паросодержания.

е) На экономайзерном участке зоны тепловыделения имеет место рост температуры имитаторов твэл. Удельное электрическое сопротивление имитатора твэл зависит от температуры, поэтому при повышении температуры имитатора это сопротивление может изменяться. Неравномерное электрическое сопротивление по длине имитатора твэл приводит к неравномерному профилю тепловыделения. Неравномерный профиль тепловыделения не учитывался в расчетах по определению температуры в исследуемом сечении и не моделировался в базовых валидационных расчетах. По этому была проведена оценка влияния температуры имитатора твэл на его удельное сопротивление. Проведенный анализ показал что удельное сопротивление имитатора твэл в рассмотренном диапазоне изменения температуры изменяется незначительно. Можно сделать вывод о том, что изменение электрического сопротивления не оказывает существенного влияния на профиль тепловыделения.

ж) В RELAP5/MOD3.2 в тепловыделяющих элементах конструкции не моделируется осевая теплопроводность. Наличие осевой теплопроводности между разнонагретыми участками имитаторов ТВЭЛ может быть причиной неравномерного профиля тепловыделения. Для оценки того, насколько правомерно для решения данной задачи допущение об отсутствии осевой теплопроводности, был рассчитан осевой тепловой поток через сборку имитаторов ТВС на однофазном участке. По проведенным оценкам величина теплового потока в осевом направлении составила 0.063 Вт. Эта величина пренебрежительно мала в сравнении с теплом, отводимым через имитаторы твэл в радиальном направлении. На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что осевая теплопроводность не оказывает существенного влияния на профиль тепловыделения.

Заключение

RELAP5/MOD3.2 в целом позволяет адекватно рассчитывать распределение истинных объемных паросодержаний по высоте технологического канала РБМК.

Согласование результатов расчетов с экспериментом в области кипения насыщенной жидкости можно охарактеризовать как хорошее.

Некоторое рассогласование между расчетными и экспериментальными результатами наблюдается в области кипения недогретой жидкости. Для валидационного анализ процесса кипения недогретой жидкости необходимы экспериментальные данные о температурах потока и стенки экспериментального канала в исследуемых сечениях.

В рассматриваемых расчетах использовались экспериментальные данные, полученные при значениях относительной энтальпии X ниже 0.5. Представляет интерес провести валидацию кода RELAP5 по экспериментальным данным, полученным при более высоких значениях относительной энтальпии ($X > 0.5$).