

ПРОБЛЕМЫ ВЕРИФИКАЦИИ СИСТЕМНЫХ КОДОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Е. Д. Домашев¹, М. М. Ковецкая¹, А. Ю. Зенюк², В. Н. Колочко²

¹*Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев*

²*Министерство топлива и энергетики Украины, Киев*

Проведен анализ использования системных кодов RELAP и CATHARE для моделирования аварийных режимов ядерных энергетических установок. Показано наличие проблемы моделирования кризиса теплообмена, вызванного осушением теплоотдающей поверхности, в нестационарных режимах.

Анализ аварийных процессов, предшествующих разрушению активной зоны реакторной установки, показал, что на первой стадии аварии важную роль играют теплогидравлические процессы, связанные с потерей теплоносителя, снижением теплоотвода за счет прекращения циркуляции теплоносителя. Комплекс научных исследований, проведенных мировым сообществом в рамках международных стандартных проблем (ISP), позволил максимально снизить степень неопределенности описания процессов в первом контуре энергетических реакторов, предшествующих разрушению активной зоны, и достаточно надежно верифицировать системные теплогидравлические коды TRAC, RELAP, CATHARE, ATHLET, COBRA и др. Сравнение результатов интегральных тестов на крупномасштабных теплофизических стендах SPES (Италия), BETSY (Франция), ROSA (Япония), PKL и UPTF (Германия), LOFT и SEMISCALE (США) позволяют с уверенностью использовать эти расчетные программы для анализа безопасности PWR.

Наибольший опыт расчетных и верификационных работ применительно к обоснованию безопасности ВВЭР накоплен по коду RELAP, который прошел тестирование на интегральных стендах ИСБ-ВВЭР (Россия) и РМК (Венгрия) [1]. В высокой степени готовности к применению в работах по анализу безопасности ВВЭР находятся также немецкий код ATHLET и французский код CATHARE [2, 3]. Однако работы по верификации этих кодов не прекращаются.

Результаты моделирования аварии SPE-4 (7,4 % разрыв холодной ветви реактора ВВЭР-440) на основе RELAP/MOD3/1 и CATHARE 2V1.3E показали [4], что оба кода в основном хорошо предсказали основные события аварии. Наиболее существенным был анализ способности кодов предсказать осушение обогреваемой поверхности активной зоны реактора. Результаты анализа показали, что одномерная математическая модель гидродинамики, используемая в кодах, не позволяет с достаточной точностью предсказать кризис теплообмена и осушение теплоотдающей поверхности. Авторы отмечают, что более детальная нодализационная схема кода CATHARE позволила получить лучшее совпадение с экспериментальными данными, полученными на интегральном стенде РМК-2 (Венгрия), который является полномасштабной моделью реактора ВВЭР-440.

Аналогичные трудности с предсказанием кризиса осушения поверхности тепловыделяющих элементов активной зоны реактора возникают и при расчетах по программе ДИНАМИКА [5]. Для улучшенной оценки теплофизических процессов в каналах активной зоны используется программа КАНАЛ, основанная на негомогенной неравновесной модели двухфазного потока [6]. Авторами [7] была проведена верификация программы КАНАЛ в задаче определения условий возникновения кризиса теплообмена в дисперсно-кольцевом потоке в нестационарном режиме с падением расхода теплоносителя в вертикальной парогенерирующей трубе диаметром 8 мм, длиной 1 м при среднем давлении 10 МПа, в диапазоне тепловой нагрузки от 0,8 до 2,5 МВт/м², массовой скорости $\rho w_0 = 500$ -

- 2000 кг / (м² · с), недогрева теплоносителя на входе $\Delta T_{\text{ВХ}} = 5 - 100$ К. Экспериментальные данные для верификации были получены на теплогидравлическом стенде ИТТФ НАН Украины КОЛЬЦО [8]. В результате анализа экспериментальных данных о структуре дисперсно-кольцевого потока были получены замыкающие уравнения, описывающие процессы взаимодействия пристенной пленки жидкости с парокапельным ядром потока. Новая система замыкающих уравнений позволила корректно описать и рассчитать кризис теплообмена в некоторых режимах с падением расхода теплоносителя, обусловленным выбегом насоса при его остановке. Одновременно была исследована возможность использования замыкающих уравнений, описывающих условия возникновения кризиса теплообмена в стационарных режимах, для определения момента наступления кризиса в нестационарных режимах. В табл. 1 приведены результаты расчета времени до наступления кризиса теплообмена в наиболее характерных режимах.

Таблица 1

N	$T_{\text{ВХ}}$	$\Delta T_{\text{ВХ}}$	q	ρw_0	$\tau_{\text{кр}}(\text{экс})$	$\tau_{\text{кр}}(\delta)$
	°С	°С	МВт/м ²	кг/(м ² · с)	с	с
1	284	27	1,70	2000	0,70	0,75
2	271	40	1,52	1000	0,68	0,70
3	261	50	1,84	2000	0,96	1,00
4	245	66	2,17	2000	0,56	0,80
5	228	83	2,22	2000	0,65	--

Здесь $T_{\text{ВХ}}$ - температура теплоносителя на входе, $\Delta T_{\text{ВХ}}$ - недогрев теплоносителя до температуры насыщения; ρw_0 - начальное значение массовой скорости; q - плотность теплового потока на стенке трубы; $\tau_{\text{кр}}(\delta)$ - время до возникновения кризиса теплообмена, определенное по предельному значению толщины пленки жидкости на стенке трубы равному 0,07 мм. Момент наступления кризиса теплообмена в эксперименте $\tau_{\text{кр}}(\text{экс})$ фиксировался по резкому изменению температуры стенки. Результаты расчета показали, что при малых недогревах теплоносителя на входе (менее 60 К) время до возникновения кризиса $\tau_{\text{кр}}(\delta)$ дает удовлетворительное совпадение с временем до возникновения кризиса теплообмена, полученного в эксперименте. При недогревах на входе более 60 К и с увеличением тепловой нагрузки кризис теплообмена возникает при достаточно толстой пленке. Причем эти режимы трудно рассчитывать из-за возникающих пульсаций параметров теплоносителя на выходе из канала (режим 5).

Трудности в использовании программы RELAP5 возникают и при моделировании аварийных режимов в реакторах РБМК [9]. Верификация программы проводилась путем решения стандартной проблемы безопасности «Прекращение расхода теплоносителя на входе в технологический канал РБМК при отводе остаточных тепловыделений».

После прекращения подачи теплоносителя на вход в канал при малых тепловых нагрузках реализуется режим циркуляции с противотоком фаз. Повышение тепловой нагрузки вызывает постепенное запаривание тепловыделяющей сборки.

Экспериментальные данные, необходимые для верификации, получены на стенде КС в РНЦ «Курчатовский институт». Эксперименты проводились для 9 режимов при следующих начальных условиях: давлении 4,4 - 7,8 МПа, массовой скорости 0,51 - 0,58 кг/с, температуре на входе 507 - 539 К, тепловой нагрузке 96,2 - 257 кВт. Аварийный режим моделировался путем быстрого закрытия запорно-регулирующего клапана и прекращения расхода теплоносителя на входе в технологический канал с тепловыделяющей сборкой при постоянной мощности тепловыделения.

В результате проведенного верификационного анализа было получено, что при сравнительно небольших тепловых нагрузках выход в зону ухудшенного теплообмена осуществлялся за счет опрокидывания потока в пароводяных коммуникациях и выпаривания жидкости в подъемном тракте над тепловыделяющей сборкой. При более высоких тепловых нагрузках как в расчетах, так и в экспериментах происходит локальное запаривание тепловыделяющей сборки и выход в зону ухудшенного теплообмена прежде, чем выпарится вся жидкость в подъемном тракте. Расчетное время выхода в зону ухудшенной теплоотдачи оказалось значительно меньше экспериментального. Полученные в расчете данные об изменении во времени перепадов давления на разных участках канала удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов. Обобщенные результаты верификационных расчетов представлены на рис. 1 в виде зависимости промежутка времени между полным прекращением подачи теплоносителя в технологический канал и моментом наступления ухудшенной теплоотдачи $\Delta\tau_{yx}$ от мощности тепловыделяющей сборки Q .

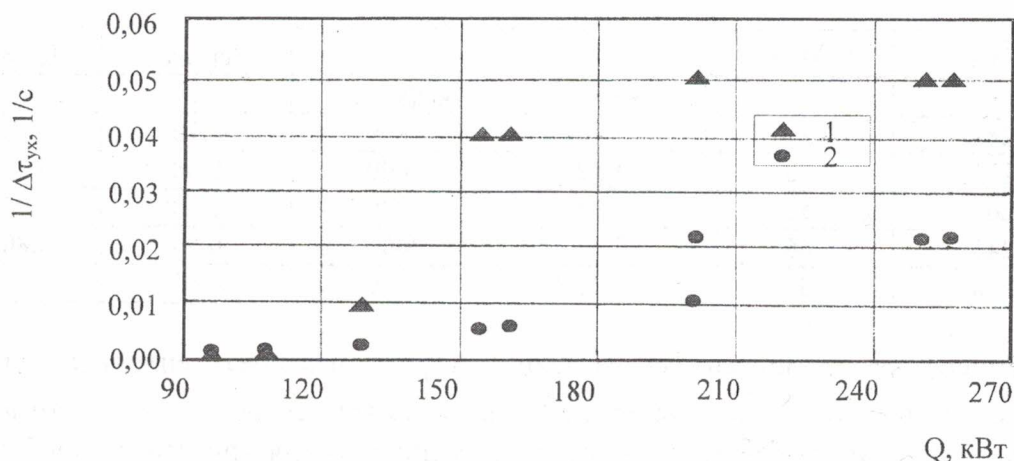


Рис. 1. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимости $1/\Delta\tau_{yx} = f(Q)$:
1 - расчет; 2 - эксперимент.

При низких тепловых нагрузках наблюдается приемлемое согласование экспериментальных и расчетных данных. С повышением тепловой нагрузки расчетный промежуток времени до наступления ухудшенной теплоотдачи становится значительно (на порядок) меньше экспериментального. При дальнейшем повышении нагрузки разница расчетного и экспериментального значения $\Delta\tau_{yx}$ сокращается ($\Delta\tau_{yx}$ в расчетах приблизительно в два раза меньше, чем в эксперименте).

В целом согласование результатов расчета с экспериментом характеризуется как «минимальное». Для улучшения согласования результатов расчета с экспериментом необходимо уточнение корреляционных зависимостей, описывающих межфазное взаимодействие в вертикальных каналах с тепловыделяющей сборкой и в горизонтальных трубах.

Особый интерес представляют вопросы верификации кодов в натуральных условиях, например при моделировании событий, происходящих на эксплуатируемых энергоблоках [10]. Для верификации кода RELAP5/M3.2 рассмотрен переходный процесс на энергоблоке ВВЭР 1000/320. Нарушение произошло во время планового расхаживания стопорного клапана СК турбопитательного насоса ТПН-1 на энергоблоке № 5 Запорожской АЭС 25 ноября 1998 г. Исходным событием послужила ошибка оператора - снижение указателя положения СК ТПН-1 ниже зоны расхаживания. За начало переходного процесса принят факт опускания СК ТПН-1 ниже зоны расхаживания и последующее его резкое закрытие на 4 с. В табл. 2 представлено сравнение последовательности событий, полученных в расчете и зафиксированных на энергоблоке во время переходного процесса.

Таблица 2

Событие	Измерение, с	Расчет, с
Начало расчета	0	0
Отключение ТПН-1	3	3
Формирование сигнала ПЗ-1 (РОМ2)	5	5
Формирование сигнала ПЗ-2	7	7
Включение 2-й группы ТЭН КД	в работе	8
Включение 3-й группы ТЭН КД	8	10
Включение 4-й группы ТЭН КД	8	18
Снятие сигнала ПЗ-1	85	96
Отключение ГЦН-4	93	87
Начало работы РК на байпасе питательной воды ПГ-4	106	106
Снятие сигнала ПЗ-2	253	253
Формирование сигнала ПЗ-1	307	286
Отключение 4-й группы ТЭН КД	312	363
Снятие сигнала ПЗ-1	315	294
Отключение 3-й группы ТЭН КД	332	465
Отключение 2-й группы ТЭН КД	588	660
Конец расчета	736	736

Примечание: КД – компенсатор давления; ПЗ – противоаварийная защита; РОМ – регулятор ограничения мощности; ГЦН – главный циркуляционный насос; РК – регулирующий клапан.

Результаты расчета показали, что для всех параметров, за исключением уровня в парогенераторе ПГ- 4, получено удовлетворительное соответствие с эксплуатационными данными. В рассматриваемом переходном процессе модель RELAP5/M3.2 также обеспечивает «минимальное», согласно стандартам адекватности, соответствие результатов расчета с данными, полученными на энергоблоке.

Выводы

1. Результаты верификации системных кодов при расчетах переходных и аварийных режимов ядерных энергетических установок показали наличие проблемы моделирования теплофизических процессов, возникающих при осушении теплоотдающей поверхности как при течении двухфазного теплоносителя в трубах, так и в каналах с тепловыделяющей сборкой.

2. Ни одна из рассмотренных программ не дает уверенности в достоверности результатов расчета условий возникновения кризиса теплообмена, вызванного осушением теплоотдающей поверхности в водоохлаждаемых каналах энергетических установок.

3. Разработчикам теплогидравлических модулей системных программ следует обратить внимание на корректность использования замыкающих уравнений, описывающих условия возникновения кризиса теплообмена на обогреваемой поверхности в быстропротекающих аварийных режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Асмолов В.Г.* Результаты исследования тяжелых аварий водоохлаждаемых реакторов// Атомная энергия. – 1994. – Т. 76, вып. 4. – С. 282 – 302.
2. *Sabotinov L.* Total Loss of SG Feed Water for a VVER-1000/V-320. France IPSN, 1997. - 41 p.
3. *Нигматулин Б.И., Блинков В.Н., Лобачев А.Г. и др.* Постановка и решение по программе ATHLET задачи об устойчивости кипящего теплоносителя в технологических каналах реактора РБМК // Теплоэнергетика. - 1998. Т. 12. - С. 44 – 52.

4. *Hassan Y.A., Cebull P.* Simulation of the PMK-2 test facility using RELAP5 and CATHARE2 computer codes / Proc. of the intern. conf. on Thermophysical Aspects of WWER- type Reactor Safety. - 1995. - Vol. 2. - P. 249 - 256.
5. *Программа для ЭВМ БЭСМ-6* расчета нестационарных режимов энергетических установок с ВВЭР ДИНАМИКА. Б-141, ГКАЭ ОКБ «Гидропресс», 1988.
6. *Кузнецов Ю.Н., Девкин А.С.* Математическая модель нестационарного неравновесного неомогенного двухфазного потока в канале // Теплофизика высоких температур. -1984. -Т. 22, № 3. - С. 544 - 549.
7. *Домашев Е.Д., Ковецкая М.М., Колочко В.Н.* Некоторые проблемы верификации результатов расчета теплофизических процессов в циркуляционном контуре ЯЭУ при моделировании аварийных режимов // Пром. теплотехника. - 1999. -Т. 21, № 4 - 5. - С. 107 - 110.
8. *Домашев Е.Д., Архитов А.П., Глыгало В.В., Колочко В.Н.* Экспериментальные стенды и установки для обоснования безопасности АЭС Украины // Пром. теплотехника. - 1993. - Т. 15, № 4. - С. 98 - 103.
9. *Брус Н.А., Гакал П.Г., Горбенко Г.А. и др.* Решение кодом RELAP 5 стандартной проблемы безопасности «Прекращение расхода теплоносителя на входе в технологический канал РБМК при отводе остаточных тепловыделений» // Пром.теплотехника. - 2001. - Т. 23, № 1 - 2. - С. 87 - 91.
10. *Домашев Е.Д., Громов Г.В., Смышляев А.Е., Скалозубов В.И.* О применимости кода RELAP5/M3.2 для анализа аварийных и переходных процессов на типовом блоке ВВЭР 1000/320 // Пром. теплотехника. - 2000. - Т. 22, № 4. - С. 46 - 50.

ПРОБЛЕМИ ВЕРИФІКАЦІЇ СИСТЕМНИХ КОДІВ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПЕРЕХІДНИХ І АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Е. Д. Домашев, М. М. Ковецька, О. Ю. Зенюк, В. М. Колочко

Проведено аналіз використання системних кодів RELAP і CATHARE для моделювання аварійних режимів ядерних енергетичних установок. Показано існування проблеми моделювання кризи теплообміну, який виникає внаслідок осушення поверхні, що віддає тепло, у нестационарних режимах.

PROBLEMS OF VERIFICATION OF SYSTEM CODES FOR MODELING TRANSIENT AND ACCIDENTAL MODES OF NUCLEAR POWER PLANTS

E. D. Domashev, M. M. Kovetskaya, A. Yu. Zenyuk, V. N. Kolochko

We carry out an analysis of using RELAP and CATHARE system codes for modelling accidental modes of nuclear power plants. We show that the problem of modelling heat transfer crisis caused by drying of heat-transfer surfaces under non-stationary conditions.

Поступила в редакцію 26.06.01,
после доработки - 07.02.02.