Проблемы повышения надежности расчетного определения кризиса теплоотдачи в водоохлаждаемых реакторах на основе компьютерных теплогидравлических кодов

Выполнен анализ современного состояния исследований и работ в области создания теплогидравлических расчетных кодов. Проанализирован опыт создания зарубежных версий кодов улучшенной оценки. Значительное внимание уделено проблемам расчетного определения критических тепловых потоков в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов. Показано, что реализованные в современных расчетных кодах методы определения значений критического теплового потока требуют дальнейшего совершенствования. Рассмотрены современные методики прогнозирования кризиса теплоотдачи в реакторных каналах. Проанализированы известные методы расчетного определения критического теплового потока в каналах ядерных реакторов. Рассмотрены особенности определения кризиса теплоотдачи при вынужденном движении пароводяного потока. Выполнен анализ адекватности программных компьютерных комплексов, предназначенных для расчета параметров безопасности водоохлаждаемых ядерных реакторов. Рассмотрены представления о физическом механизме кризиса теплоотдачи при вынужденном движении двухфазного потока в обогреваемых каналах. Особое внимание уделено анализу экспериментальных и расчетных данных относительно условий возникновения кризиса теплоотдачи в стержневых сборках тепловыделяющих элементов.

Ключевые слова: компьютерные теплогидравлические коды, критический тепловой поток, кризис теплоотдачи.

Целью работы является оценка возможных неточностей при определении располагаемого запаса до кризиса теплоотдачи с использованием теплогидравлических расчетных кодов.

Одной из приоритетных задач в обосновании эксплуатационной безопасности ядерных энергоблоков является обеспечение высокой надежности расчетного определения критических тепловых потоков (КТП) в тепловыделяющих сборках (ТВС) водоохлаждаемых ядерных реакторов (ВОЯР) на основе современных версий компьютерных теплогидравлических расчетных кодов (ТГРК). Так, согласно данным анализа, выполненного в работе [1], в указанных компьютерных кодах, включая наиболее широко используемые программные продукты, например RELAP и CORSAR, для расчета КТП, т. е. предельной тепловой нагрузки твэлов в активных зонах (АкЗ) ВОЯР, в большинстве случаев используют эмпирические соотношения, полученные на основе экспериментов в цилиндрических каналах. В то же время применение такого подхода, как будет показано далее, не всегда позволяет получить адекватные результаты. В этой связи следует отметить, что согласно данным [2], в настоящее время накоплено значительное количество экспериментальных данных по величине КТП в основных типах геометрии парогенерирующих каналов (ПК) — цилиндрических, кольцевых — и ТВС. Так, для цилиндрических каналов различной длины и диаметра систематизировано более 25 000 экспериментальных точек по величине КТП; для каналов кольцевой геометрии подобный массив превысил 12 000 точек; для ТВС с треугольной решеткой твэлов, характерной для реакторов ВВЭР, — до 5 000 кризисных значений теплового потока, а для квадратной геометрии ТВС, используемой в зарубежных реакторных установках (РУ), объем аналогичного массива данных достигает 12 000 значений КТП. Наличие этих данных позволило специалистам перейти к их комплексному анализу и обобщению с учетом многофакторного характера зависимости величин КТП от определяющих ее режимных параметров процесса теплообмена и характеристик ПК. На основе анализа данных была получена информация о наиболее значимых параметрах процесса теплообмена, которые определяют значения КТП в каналах различной формы. Например, установлено, что в цилиндрических каналах значения КТП, обозначаемые далее через $q_{кр}$, в определяющей степени зависят от таких режимных параметров, как давление p , относительная энтальпия (массовое паросодержание) X , массовая скорость ρw , диаметр проходного сечения трубы d , относительное расстояние L_h/d от начала обогрева L_h , и такая зависимость может быть выражена функционалом $q_{кр} = f(p, \rho w, X, d, L_h/d)$. Кроме указанных факторов, установлена также зависимость КТП от неравномерности энерговыделения по периметру и длине цилиндрического ПК.

В работах [2, 3] подчеркивается, что расчет КТП в ТВС осложнен неравномерностью распределения параметров потока теплоносителя по ее поперечному сечению, что обуславливает наличие существенного поперечного переноса теплоты и массы между отдельными характерными теплогидравлическими ячейками (ТГЯ), формирующими соответствующие субканалы с различной формой теплоотдающей поверхности. Таким образом, реальные ТВС ВОЯР отличаются от цилиндрических каналов не только геометрически, они отличаются еще характером и топологией областей теплообмена между отдельными субканалами. Очевидно, что в цилиндрическом канале теплопередача изменяется преимущественно вдоль аксиальной координаты

Рис. 1. Физическое проявление эффекта пучка в ТВС [2]:

$q_{сб}/q_{тр}$ — отношение КТП в сборке к КТП в трубе;
 1 — $\rho_w = 500$ кг/(м²·с); 2 — $\rho_w = 1000$ кг/(м²·с);
 3 — $\rho_w = 2000$ кг/(м²·с); 4 — $\rho_w = 3000$ кг/(м²·с);
 5 — $\rho_w = 5000$ кг/(м²·с)

ПК, что и отражают зависимости по КТП для труб, используемые в подавляющем большинстве версий ТГРК, например RELAP-5/MOD3.2, которые фактически являются одномерными. Анализ адекватности расчетных соотношений по КТП в цилиндрических каналах и ТВС выполнен в работе [1].

Как уже было отмечено, в ТВС, наряду с теплопередачей вдоль аксиальной координаты ПК, происходят и тепло-массообменные процессы между отдельными субканалами. Учет этого важного фактора, который принято называть эффектом пучка*, обеспечивают «двумерные» (называемые также канальными) ТГРК, типичными представителями которых являются ПУЧОК (Россия) и COBRA (США). Объективная необходимость учета влияния указанных различий условий протекания процессов теплообмена в цилиндрических каналах и ТВС может быть проиллюстрирована, в частности, представленной на рис. 1 диаграммой изменения соотношения величин КТП в цилиндрических каналах и ТВС в различных диапазонах режимных параметров из работы [2].

Как следует из приведенных на рис. 1 данных, для ТВС реакторов ВВЭР расчетными соотношениями для КТП в трубах следует пользоваться с осторожностью, поскольку значения КТП, получаемые в результате использования одномерных ТГРК, в области низких значений $p/p_{кр}$ могут быть существенно завышены, особенно при аварийном снижении давления и расхода теплоносителя в АкЗ. А это значит, что широко используемые для обоснования безопасности действующих и проектируемых АЭС версии современных ТГРК не всегда точно описывают имеющиеся массивы экспериментальных данных по КТП для ТВС АкЗ даже при использовании простейшей — цилиндрической — геометрии канала. В особой мере сказанное относится к реальным ТВС с гексагональной и квадратной геометрией пучка твэлов.

Вместе с тем отметим, что в ряде современных ТГРК предусмотрена возможность настройки расчетной модели,

используемой для описания тепломассообмена в ТВС, с учетом конкретных значений отношения диаметра твэлов к их шагу в пучке, а также турбулизирующего влияния решеток ТВС. Рекомендованные значения соответствующих коэффициентов для учета этих факторов приведены в [1].

Таким образом, становится очевидным, что отсутствие учета двумерного характера распределения важнейших параметров теплогидравлических процессов по поперечному сечению ТВС может приводить к ошибкам в случае описания таких режимов теплосъема в АкЗ ВОЯР, как начало кипения и кризис теплоотдачи на поверхности твэлов, на основе имеющихся экспериментальных корреляций для цилиндрических каналов. Например, использование реализованной в версии кода RELAP-5/MOD3.2 для расчета КТП в стержневых сборках корреляции Biasi, полученной в экспериментах с трубами, согласно оценкам, выполненным в работе [2], предопределяет получение существенно завышенных расчетных данных по КТП, особенно в диапазоне массовых скоростей теплоносителя 1500–3000 кг/(м²·с). В усовершенствованной версии этого ТГРК — RELAP-5/MOD3.3 — используется более точный табличный метод расчета КТП в цилиндрических каналах, предложенный Groenvelt. Таким образом, распространенные версии современных ТГРК предусматривают использование математических моделей, не вполне адекватных двумерной физике реальных теплогидравлических процессов, протекающих в ТВС ВОЯР, а также требующих дополнительного уточнения замыкающих соотношений для решаемой системы исходных дифференциальных уравнений.

В указанном контексте следует упомянуть и одну из наиболее совершенных версий ТГРК RELAP, а именно RELAP5-3D, которая, например, нашла применение в исследовательской работе [4], посвященной анализу ряда проектных аварий на основе компьютерного моделирования переходных процессов с использованием расчетной корреляции по КТП Ю. А. Безрукова. При анализе результатов указанной работы обращают на себя внимание следующие факты: во-первых, в публикации исследуется ряд аварийных переходных процессов в ядерных энергоустановках (ЯЭУ), часть которых сопровождается существенным снижением давления в АкЗ ВОЯР; во-вторых, используемая авторами формула Ю. А. Безрукова для расчета КТП в ТВС может быть достаточно надежной только в рекомендованном Ю. А. Безруковым для данной расчетной зависимости диапазоне давлений 7,45...16,7 МПа; в-третьих, о реальной динамике снижения давления в АкЗ реактора ВВЭР-1000 в процессе развития гипотетических аварий авторы работы [4] не сообщают, что в некоторой степени ставит под сомнение их результаты, прежде всего касающиеся оценок значений коэффициента располагаемого в процессе аварии запаса до кризиса теплоотдачи в АкЗ ЯР.

Относительно адекватности данных, получаемых при расчетах КТП на основе использования корреляции Ю. А. Безрукова, следует в то же время отметить, что выполненное в свое время в работе [5] их сопоставление с результатами других исследователей (рис. 2) свидетельствует о достаточной адекватности за исключением области низких паросодержаний, в которой имеет место некоторое завышение данных по КТП относительно экспериментальных значений и данных других авторов.

При этом с позиций оценки адекватности применяемых в настоящее время методических подходов к расчетному определению величины КТП в ТВС ВОЯР показательной является работа [6], в которой предложена процедура

* Эффект пучка, физика которого проанализирована в [1], исследован и систематизирован в Государственном научном центре Российской Федерации «Физико-энергетический институт» (ГНЦ РФ ФЭИ).

Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных по КТП в семистерженной сборке тепловых имитаторов твэлов с результатами расчетов по зависимостям различных авторов: 1 — В. С. Осмачкин; 2 — Ю. А. Безруков; 3 — В. Н. Смолин; 4 — З. Л. Миропольский; 5 — И. С. Дубровский; 6 — В. И. Толубинский; ○ — результаты фиксации КТП в экспериментах работы [5] при режимных параметрах $p = 14,7$ МПа, $\rho_w = 1000$ кг/(м²·с)

комплексного анализа экспериментальных и расчетных данных по КТП в основных типах ПК, а также представлены результаты сравнительного анализа расчетных методов, применяемых при оценке величины КТП в ТВС с использованием указанной процедуры. Этот анализ проведен по двум массивам экспериментальных результатов из банка данных ФЭИ.

Первый массив получен для следующих условий: обогрев равномерный по длине и радиусу; все стержни обогреваемые; число стержней 7, 19, 37; упаковка треугольная; обечайка шестигранная; диаметр стержней от 5,8 до 14 мм; относительный шаг стержней от 1,02 до 1,52 отн. ед.; обогреваемая длина сборок от 0,8 до 7,0 м; тепловой диаметр от 2,81 до 21 мм; давление от 2,2 до 20,0 МПа; массовая скорость от 200 до 5000 кг/(м²·с). Объем первого массива составил 5072 точки.

Второй массив, включающий данные по КТП для низких давлений и низких массовых скоростей, описывает теплообмен в следующих условиях: обогрев неравномерный по длине и равномерный по радиусу; число стержней 19; упаковка треугольная; обечайка шестигранная; диаметр стержней 9 мм; относительный шаг стержней 1,4; длина сборки 3,0 м; все стержни обогреваемые; тепловой диаметр 10,45 мм; давление от 0,19 до 3,0 МПа; массовая скорость от 50 до 350 кг/(м²·с). Всего в массиве 80 точек.

В сравнительном анализе работы [6] использованы следующие методики расчета КТП:

1. Табличный метод AECL, который основан на скелетной таблице для КТП в цилиндрических каналах. Первоначально авторы метода исходили из предположения, что КТП в ТВС соответствуют критическим тепловым потокам в трубах при одинаковых значениях p , G , X , d_h . В более поздних версиях метода введен ряд поправок, учитывающих эффект пучка.

2. Метод Biasi, использующий экспериментальные корреляции для цилиндрических каналов в диапазоне режимных параметров: давление в интервале от 3 до 10 МПа; массовая скорость от 200 до 5 500 кг/(м²·с), область относительных энтальпий — положительная.

3. Метод ОКБ «Гидропресс», использующий упомянутую расчетную зависимость Ю. А. Безрукова, которая получена в экспериментах со сборками тепловых имитаторов твэлов реактора ВВЭР-1000. Отметим, что эта зависимость справедлива только для случаев равномерного по длине обогрева, одного диаметра стержней, одного относительного шага и одной длины твэлов (около 3 м). Кроме того, формула не учитывает влияния возможных изменений геометрических факторов, например турбулизирующего действия дистанционирующих устройств на входе в сборку. Комплексное влияние указанных факторов на КТП автором оценивается в $\pm 10...15$ %.

4. Метод ИАЭ «Курчатовский институт», использующий известную специалистам корреляцию В. С. Осмачкина для случая равномерного обогрева ПК.

5. Табличный метод Центра теплофизических данных (ЦТД) ФЭИ, основанный на таблице по КТП в ТВС с треугольной решеткой. Метод позволяет учесть не только равномерное, но и неравномерное (при расчете по отдельным субканалам) тепловыделение в поперечном сечении ТВС; аксиальное тепловыделение может быть равномерным или неравномерным (при введении соответствующих поправок).

Качественные характеристики перечисленных методов можно оценить с помощью табл. 1, в которой приведены результаты сопоставления расчетных данных по КТП применительно к первому из описанных массивов данных.

Проведенные автором исследования и представленные в табл. 1 данные позволяют заключить следующее:

1) табличный метод AECL дает завышенные значения КТП по сравнению с экспериментальными данными в среднем на 40 %, однако в области низких значений параметров p и G это завышение может достигать сотен процентов. Следует считать, что данный метод в целом не адекватен для расчета КТП в ТВС с треугольной решеткой в широком диапазоне режимных параметров;

Таблица 1. Интегральные ошибки различных методов расчета КТП (по локальным выходным параметрам) [6]

Статистические параметры	Метод					
	AECL	Biasi	ОКБ «Гидропресс»	ИАЭ	ФЭИ	ФЭИ (при ограниченных параметрах)
Число экспериментальных точек в диапазоне параметров, рекомендованных для данного метода	4997	3594	1856	1930	4997	1856
Средняя ошибка, %	-41*	-33	-4	-13	-2	-3
Среднеквадратичная ошибка, %	43	35	17	27	20	17

*Минус означает, что экспериментальные значения ниже расчетных.

2) метод Biasi описывает данные по ТВС со значительными погрешностями, причем для 95 % диапазона параметров экспериментальные данные по КТП для ТВС оказываются существенно ниже результатов соответствующих расчетов;

3) метод ОКБ «Гидропресс» приводит к завышению КТП не менее 5 % практически во всем диапазоне режимных параметров, причем отклонение экспериментальных данных от расчетных находится в интервале от -33 до +4 %;

4) метод ИАЭ «Курчатовский институт» имеет удовлетворительные характеристики как по широте адекватно описываемого диапазона режимных параметров, так и по точности описания, причем этот метод предпочтителен при давлениях более 10 МПа;

5) табличный метод ЦТД ФЭИ является достаточно адекватным и может быть использован во всем предусмотренном авторами диапазоне режимных параметров, поскольку позволяет получать результаты с достаточно высокой точностью.

Таким образом, результаты сопоставления расчетных методик свидетельствуют о предпочтительной применимости двух из рассмотренных методов — ЦТД ФЭИ и ОКБ «Гидропресс». При этом метод ЦТД ФЭИ дополнительно позволяет учесть влияние аксиальной неравномерности тепловыделения, что характерно для второго из упомянутых массивов экспериментальных данных. В таких условиях полная длина обогрева (3 м) была разделена на входной и выходной участки равной протяженности, и на этих участках плотность теплового потока была соответственно выше и ниже средней на 28 %, причем давление не превышало 2...3 МПа, а массовая скорость составляла не более 300 кг/(м²·с).

Для повышения адекватности сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными в случае аксиальной неравномерности тепловыделения авторами [6] использовалась соответствующая поправка, или форм-фактор

$$q_{\text{нр}} = q_{\text{рав}} F,$$

где F — поправка на неравномерность тепловыделения по длине.

Для указанных низких параметров в литературных источниках (например, [7]) рекомендации по определению параметра F отсутствуют. С учетом этого обстоятельства в работе [6] проведен анализ формул для расчета параметра F , применяемых при режимах эксплуатации ВОЯР, близких к номинальным. По результатам анализа наиболее адекватной в этой работе признана поправка ОКБ «Гидропресс»:

$$F = \left[\left(\frac{1}{q_{\text{ср}} L_{\text{ср}}} \right) \int_{L-L_p}^L q(z) dz \right]^n.$$

Значение входящей в эту формулу длины релаксации L_p для условий, близких к номинальным, обычно оценивают величиной 0,7 м. Однако применительно к рассматриваемым аварийным условиям авторы работы [6] рекомендуют учитывать зависимость этого параметра от давления, массовой скорости G , балансного паросодержания X и диаметра стержней d_0 в соответствии с зависимостью

$$L_p = Ad_0(G/1000)^{0,25}(p/p_{\text{кр}})^{-0,5}\exp(3X).$$

Таблица 2. Сравнение результатов расчетов с использованием методов ФЭИ и АЕСЛ с данными экспериментов для области аварийно низких значений режимных параметров [6]

Давление p , МПа	Массовая скорость G , кг/(м ² ·с)	Балансное паросодержание $X_{\text{ср}}$	Экспериментальное значение КТП q_e , МВт/м ²	Расчетное значение КТП q_r , МВт/м ² (ЦТД)	Относительное значение потока q_e/q_r (ЦТД)	q_r , МВт/м ² (АЕСЛ)	q_e/q_r (АЕСЛ)
0,19	99,0	0,706	0,179	0,172	1,043	0,82	0,22
0,374	203,0	0,564	0,309	0,294	1,052	1,41	0,22
0,373	306,0	0,474	0,410	0,358	1,146	1,70	0,24
0,38	304,0	0,490	0,367	0,354	1,038	1,68	0,22
0,56	103,0	0,802	0,203	0,189	1,075	1,067	0,12
0,602	206,0	0,597	0,339	0,322	1,05	2,61	0,13
0,603	310,0	0,530	0,389	0,338	1,151	3,08	0,13
0,96	104,0	0,830	0,225	0,217	1,035	1,25	0,18
0,97	313,0	0,518	0,380	0,334	1,143	2,00	0,24
0,99	201,0	0,655	9,363	0,366	0,991	1,41	0,26
1,49	111,0	0,761	—	0,303	0,570	1,19	0,25
1,49	206,0	0,690	0,394	0,383	1,028	1,19	0,33
1,45	315,0	0,596	0,387	0,394	0,983	1,35	0,29
2,98	101,0	0,879	0,233	0,185	1,259	0,73	0,32
2,95	198,0	0,747	0,408	0,399	1,205	0,79	0,52
2,97	312,0	0,636	0,430	0,430	1,001	0,80	0,51

На основе табличного метода ЦТД ФЭИ для оценки величины параметра F выполнены соответствующие расчеты и получено рекомендуемое значение коэффициента $A = 12,5$. В результате значение форм-фактора F при низких параметрах составило от 1,0 до 0,7...0,8 (при давлении 2...3 МПа). Результаты сравнения для некоторых точек по данным работы [6] приведены в табл. 2.

При сравнении результатов расчета по методу АЕСЛ с данными экспериментов для низких параметров использовались те же поправки на неравномерность тепловыделения, что и в методе ЦТД. Сравнение результатов расчета по методу АЕСЛ с экспериментальными данными при указанных условиях свидетельствует об их значительном расхождении. При этом результаты расчета по методу АЕСЛ превышают данные экспериментов на сотни процентов, что также отражено в табл. 2.

Показательно, что для метода ФЭИ средние ошибки составляют $(q_e/q_r)_{\text{ср}} = 1,001$, среднеквадратическая ошибка $\sigma = 18,7$ %, а для метода АЕСЛ $(q_e/q_r)_{\text{ср}} = 0,24$, $\sigma = 63$ %.

Сравнение всех пяти проанализированных методов представлено в табл. 3. Там же приведены диапазоны параметров применимости этих методов и погрешности описания опытных данных.

Результаты представленного по данным работы [6] сопоставления точности определения КТП по различным

Таблица 3. Сравнение различных методов расчета [6]

Показатель	Метод				
	АЕСЛ	Biasi	ОКБ ГП	ИАЭ	ЦТД ФЭИ
Давление, МПа	0,1...20	3...1	7,45...16,7	4...18	0,1...20
Массовая скорость, кг/(м ² ·с)	0...8 000	200...5 500	700...3 800	500...5000	50...5 000
Балансное паросодержание	-0,5...+1	>0,0	-0,07...+0,3	-0,5...+0,3	-0,5...+0,9
Тепловой диаметр, мм	5...20	3,5...30	9...10	4...20	2,81...21
Шаг стержней	Без ограничений	Без указаний	1,34	1,3...1,5	1,02...1,52
Длина	$L/d_h > 40$	Без указаний	>1,0 м	0,4...7,0 м	$L/d_h > 40$
Средняя ошибка $(q_e/q_r)_{cp}$	0,59	0,67	0,96	0,87	0,98
Среднеквадратичная ошибка, %	43	35	17	27	20
Число экспериментальных точек в диапазоне метода	4 997	3 594	1532	1 930	4 997

Рис. 3. Результаты сопоставления данных расчета и эксперимента по распределению теплогидравлических параметров по сечению экспериментальной ТВС:

I — среднее значение массовой скорости в ТВС 1500 кг/(м²·с);II — то же, 2000 кг/(м²·с);

a — отношение массовой скорости в ТГЯ к средней по ТВС; б — паросодержание в ТГЯ;

1 — боковая ячейка; 2 — угловая ячейка; 4, 5 — центральные ячейки

методикам, используемым в одномерных кодах, позволяют конкретизировать следующие особенности рассмотренных в ней методов:

метод АЕСЛ применим в широком диапазоне параметров, однако не обладает достаточной точностью, особенно в аварийных условиях, характеризуемых низкими давлениями и массовыми скоростями;

метод Biasi, используемый в ранних версиях кода RELAP, отличается достаточно высоким уровнем погрешностей и может считаться практически применимым только в штатном диапазоне режимных параметров;

методы ОКБ «Гидропресс» и ИАЭ характеризуются достаточно высокой точностью, однако также применимы только в исследованных авторами диапазонах параметров;

метод ЦТД ФЭИ предпочтителен по сравнению с другими методами определения КТП как по диапазону применимости, так и по точности описания.

В дополнение к результатам изложенного анализа в рассматриваемом контексте представляет практический интерес приведенное в [8] с использованием данных проведенных в США экспериментов сопоставление результатов расчетов и экспериментов по распределению массовой скорости и паросодержания по отдельным ТГЯ поперечного сечения экспериментальной ТВС. Последняя представляла собой рабочий участок с 16 тепловыми имитаторами твэлов в квадратной упаковке при общей длине участка 1,66 м. Сопоставление результатов расчета с использованием двумерных ТГРК и данных экспериментов, выполненных при давлении 7 МПа и различных массовых скоростях, представлено на рис. 3.

Расчеты сделаны на основе компьютерной реализации кодов COBRA-III-C (США) и ПУЧОК БМ-ДФ (Россия). На рис. 3 заштрихованная область соответствует экспериментальным данным, сплошная линия иллюстрирует результаты расчета с использованием кода ПУЧОК БМ-ДФ, штриховая — результаты расчета по ТГРК COBRA-III-C. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных на рис. 3 показывают их достаточно высокую корреляцию. Однако нужно учитывать, что объектом экспериментальных исследований служила ТВС с укороченной (по сравнению с реальными ТВС АкЗ ВВЭР-1000) длиной твэлов. Полученные данные свидетельствуют о приемлемой точности результатов расчета распределения основных параметров потока по различным характерным ТГЯ за исключением угловых ячеек. В этом типе ТГЯ результаты расчета по обоим двумерным ТГРК говорят о некотором завышении значений относительной энтальпии. Можно предположить, что в условиях ТВС гексагональной геометрии подобное расхождение будет в определенной мере нивелировано.

В этой связи при оценке адекватности «двумерного» подхода к анализу теплогидравлических процессов в ТВС практический интерес представляют данные по кризису теплоотдачи в сборках твэлов различной геометрии и реальной высоты АкЗ ввиду того, что неравномерность распределения энтальпии по характерным ТГЯ по мере роста расстояния от входа в сборку может оказаться существенно выше, чем в рассмотренном сопоставлении. Некоторые данные по анализу влияния этого эффекта на значения КТП в ТВС стандартной высоты АкЗ проанализированы в [8].

В контексте изложенного показательной следует считать работу [9], в которой предложен практический подход, позволяющий достаточно адекватно учесть основные физические особенности протекания процесса тепломассообмена в ТВС при расчете аварийного переходного процесса в АкЗ реактора ВВЭР-1000, который обусловлен эффектом возможного внезапного заклинивания ГЦН. Опираясь на расчетными зависимостями различных версий одномерных ТГРК, а также некоторыми из рассмотренных экспериментальных корреляций и системой корректирующих коэффициентов, авторы достигают результатов, в полной мере соответствующих действующим требованиям стандартных процедур анализа безопасности. Предложенный подход достаточно эффективно адаптирует получаемые результаты расчетов к сложным особенностям протекания процессов тепломассообмена в рассматриваемых аварийных условиях и может считаться паллиативным решением,

которое, однако, позволяет обеспечить выполнение требований действующих нормативных документов. Указанный подход вполне правомочен, причем адекватность результатов его применения все же может быть повышена на основе применения ряда поправочных функций, включая скорректированный форм-фактор, уточненные методы учета которых приведены в [1]. Таким образом, адаптированная к практике современных процедур анализа безопасности методика работы [9] свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения сложных теплофизических процессов в ТВС ВОЯР с целью совершенствования ТГРК, широко применяемых в различных задачах оценки эксплуатационной безопасности АЭС Украины.

Выводы

1. Расчеты величины КТП на основе использования современных ТГРК в ТВС ВОЯР в области значений режимных параметров, отличных от номинальных, требуют учета влияния эффекта пучка.
2. Используемая в ТГРК RELAP5-3D расчетная зависимость для определения значений КТП, предложенная Ю. А. Безруковым, может считаться достаточно адекватной за исключением области низких относительных энтальпий, в которой ее применение может приводить к некоторому завышению результатов расчета не только относительно экспериментальных данных, но и расчетов по формулам других авторов.
3. Методики расчета КТП в ТВС, предложенные ОКБ «Гидропресс», ИАЭ и ГНЦ ФЭИ, характеризуются наибольшей точностью (они применимы, однако, только в исследованных авторами диапазонах параметров), причем метод ФЭИ наиболее предпочтителен в силу широкого диапазона его применимости и достаточно высокой точности.
4. При оценке величины КТП в ТВС наиболее эффективным следует считать применение современных двумерных ТГРК, которые обеспечивают адекватный учет неравномерности распределения основных параметров двухфазного потока теплоносителя по характерным ТГЯ сечения сборки.

Список использованной литературы

1. Носовский А. В., Шараевский И. Г., Фиалко Н. М., Зимин Л. Б., Шараевский Г. И. Теплофизика ресурса ядерных энергоустановок. К. : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2017. 624 с.
2. Бобков В. П. Критический тепловой поток при кипении воды в каналах. Современное состояние, характерные закономерности, нерешенные проблемы и пути их решения. *Теплоэнергетика*. 2015. № 2. С. 10—18.
3. Бобков В. П., Судницын О. А., Судницына М. О. Численное и аналитическое описание критических тепловых потоков в каналах. *Атом. энергия*. 1998. Т. 84. Вып. 2. С. 114—123.
4. Шкарупа А. М., Каденко И. Н. Применение кода RELAP5-3D в поддержку анализа безопасности энергоблоков АЭС Украины. *Ядерная физика та енергетика*. 2006. № 2(18). С. 75—81.
5. Шараевський І. Г. Розпізнавання передаварійних теплогідравлічних процесів у водоохолоджуваних ядерних енергетичних реакторах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. К. : ІПБ АЕС НАН України, 2010. 48 с.
6. Бобков В. П., Смогалева И. П. О точности описания различными кодами критических тепловых потоков в пучках стержней. *Теплоэнергетика*. 2001. № 3. С. 21—28.

7. Кириллов П. Л., Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). 2-е изд., исправ. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1990.

8. Ключников А. А., Шараевский Г. И., Фиалко Н. М., Зимин Л. Б., Шараевский Г. И. Теплофизиканадежности активных зон. Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2015. 772 с.

9. Воробьев Ю. Ю., Жабин О. И., Терещенко И. А. Особенности моделирования заклинивания ГЦН и учет закризисного теплообмена при помощи расчетного кода RELAP5/MOD3.2 для анализа проектных аварий для реакторов типа ВВЭР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2014. № 4. С. 17–21.

References

1. Nosovsky, A. V.; Sharaevsky, I. G.; Fialko, N. M.; Zimin, L. B.; Sharaevsky, G. I. (2017), "Thermal Physics of the Nuclear Power Plants Lifetime" [Теплофизика ресурса ядерных энергоустановок], Institute for Safety Problems of NPP NAS of Ukraine", 624 p. (Rus)

2. Bobkov, V. P. (2015), "Critical Heat Flux in a Boiling Water Channels. Current State, Common Factors, Unresolved Problems and Ways of their Solution" [Критический тепловой поток при кипении воды в каналах. Современное состояние, характерные закономерности, нерешенные проблемы и пути их решения], *Теплоэнергетика*, Iss. 2, pp. 10–18. (Rus)

3. Bobkov, V. P.; Sudnitsyn, O. A.; Sudnitsyna, M. O. (1998). "Numerical and Analytical Description of Critical Heat Flows in Channels" [Численное и аналитическое описание критических тепловых потоков в каналах], *Nuclear Energy*, Vol. 2, pp. 114–123. (Rus)

4. Shkarupa, A. M., Kadenko, I. N., (2006), "Application of RELAP5-3D Code to Support Safety Analysis Ukrainian NPP Power Units" [Применение кода RELAP5-3D в поддержку анализа безопасности энергоблоков АЭС Украины], *Nuclear Physics and Energy*, Iss. 2 (18), pp. 75–81. (Rus)

5. Sharaevsky, I. G. (2010), "Recognition of transient Thermal-Hydraulic Processes in Water-Cooled Nuclear Power Reactors" [Распознавание передовых теплогидравлических процессов в водоохлаждаемых ядерных энергетических реакторах], Doctor Thesis, Kyiv, IPB AES NAS of Ukraine, 48 p. (Ukr)

6. Bobkov, V. P.; Smogalev, I. P. (2001), "On Accuracy of Description by Different Codes of Various Critical Heat Fluxes in Beam Bundles" [О точности описания различными кодами критических тепловых потоков в пучках стержней], *Теплоэнергетика*, Iss. 3, pp. 21–28. (Rus)

7. Kirillov, P. L.; Yuriev, Yu. S.; Bobkov, V. P. (1990). "Thermohydraulic Calculations Handbook (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators)" [Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы)], 2nd revision, updated, Moscow, Energoatomizdat. (Rus)

8. Kliuchnikov, A. A.; Sharaevsky, I. G.; Fialko, N. M.; Zimin, L. B.; Sharaevsky, G. I. (2015). "Thermal Physics of Cores Reliability" [Теплофизика надежности активных зон], Institute for Safety Problems of NPP NAS of Ukraine, 772 p. (Rus)

9. Vorobyov, Yu. Yu.; Zhabin, O. I.; Tereshchenko, I. A. (2014). "Peculiarities of Modeling of MCP Jamming and Accounting of RELAP5/MOD3.2 Calculation Code for Analysis of Beyond Design-Basis Accidents for WWER-1000" [Особенности моделирования заклинивания ГЦН и учет закризисного теплообмена при помощи расчетного кода RELAP5/MOD3.2 для анализа проектных аварий для реакторов типа ВВЭР-1000], *Nuclear and Radiation Safety*, Iss. 4, pp. 17–21. (Rus)

Г. І. Шараєвський

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, Україна

Проблеми підвищення показників надійності розрахункового визначення кризи тепловіддачі у водоохолоджуваних реакторах на базі комп'ютерних теплогидравлических кодів

Виконано аналіз сучасного стану досліджень та розробок стосовно створення теплогидравлических розрахункових кодів. Проаналізовано досвід створення зарубіжних версій кодів покращеної оцінки. Значну увагу приділено проблемам розрахункового визначення критичних теплових потоків у каналах ядерних реакторів. Показано, що реалізовані в сучасних розрахункових кодах методи визначення КТП потребують подальшого удосконалення. Розглянуто сучасні методики прогнозування кризи тепловіддачі в реакторних каналах. Проаналізовано відомі методи розрахункового визначення критичного теплового потоку в каналах ядерних реакторів. Розглянуто особливості визначення кризи тепловіддачі в разі вимушеного руху пароводяного потоку. Виконано аналіз адекватності програмних комп'ютерних комплексів, призначених для розрахунку параметрів безпеки водоохолоджуваних ядерних реакторів. Розглянуто уявлення про фізичний механізм кризи тепловіддачі в разі вимушеного руху двофазного потоку в каналах, що обігріваються. Особливу увагу приділено аналізу експериментальних і розрахункових даних щодо умов виникнення кризи тепловіддачі в стрижневих збірках тепловидільних елементів.

Ключові слова: комп'ютерні теплогидравлическі коди, критичний тепловий потік, криза тепловіддачі.

G. Sharaevsky

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Chornobyl, Ukraine

Problems of Reliability Indicators Increase of Critical Heat Flux Calculations in the Water-Cooled Nuclear Reactors Based on the Computer Thermal-Hydraulic Codes

The analysis of the current state of research and developments in the field of creation of thermal-hydraulic computer codes has been performed. The experience of creation of foreign versions of best-estimate codes was analyzed. Considerable attention is paid to the issue of critical heat flux calculation of nuclear reactors channels. It is demonstrated that now the efficiency of application of modern computer codes for estimating of the heat transfer crisis in the water-cooled nuclear reactors requires further improvement. Calculation methods for accuracy increase of predicting this thermal-hydraulic phenomenon in reactor channels are considered. The well-known methods of critical thermal flux in nuclear reactors channels have been analyzed. Peculiarities of determination of the heat transfer crisis in the forced of the vapor-water steam motion have been reviewed. Adequacy of software computer codes designed to calculate the main safety parameters of water-cooled nuclear reactors was analyzed. The idea of the physical mechanism of the heat transfer crisis under forced motion of a two-phase flow in heated channels was considered. Particular attention has been paid to analysis of experimental and calculated data on conditions of initiation of a heat transfer crisis in fuel assemblies rods.

Keywords: thermal-hydraulic computer codes, critical heat flux, heat transfer crisis.

Получено 19.01.2018.