

Г. И. Шараевский\*

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина*

\*Ответственный автор: yura.sharayevskij@gmail.com

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА АВАРИЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В КАНАЛАХ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ

Рассмотрены представления о физическом механизме кризиса теплоотдачи при вынужденном движении двухфазного потока в обогреваемых каналах. Проведен анализ известных подходов и предложены методические основы разработки и применения рекомендаций по расчету и контролю кризиса теплоотдачи на АЭС с ВВЭР.

*Ключевые слова:* водоохлаждаемый ядерный реактор, двухфазный поток теплоносителя, кризис теплоотдачи.

Основу современной методологии управления безопасностью АЭС составляет концепция максимальной безопасности при минимизации необходимых для этого затрат. Реализация этой концепции требует совершенствования знаний о сложных процессах теплообмена в каналах водоохлаждаемых ядерных реакторов (ВОЯР). Потенциальная опасность неконтролируемого перехода теплогидравлических режимов от конвективной теплоотдачи сначала к пузырьковому кипению на поверхности тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), а затем и к кризису теплоотдачи первого рода и последующему разрушению тепловыделяющих сборок (ТВС) обуславливает необходимость расчетного определения потенциально опасных режимов кипения с целью адекватного прогнозирования значений тепловой нагрузки – критического теплового потока (КТП) в реакторных каналах. Наиболее важные физические аспекты возникновения и развития кризисных по теплоотдаче явлений в активных зонах (АкЗ) ВОЯР обобщены в монографии [1]. В то же время ряд фундаментальных вопросов методологических аспектов повышения надежности расчетного определения КТП в каналах ВОЯР нуждается в более подробном рассмотрении, чему и посвящена настоящая статья.

Так, согласно данным работы [2], в ядерных исследовательских центрах ведущих стран мира, которые активно развивают атомную энергетику, на рубеже веков было накоплено значительное количество экспериментальных данных по величине КТП в основных типах геометрий парогенерирующих каналов (ПК). Так, для цилиндрических каналов различной длины и диаметра в теплофизических банках данных указанных центров было аккумулировано более 25 тысяч экспериментальных точек по величине критического теплового потока в этих ПК. Для каналов кольцевой геометрии соответствующий массив

экспериментальных данных превысил 12 тысяч точек, а для ТВС с треугольной решеткой ТВЭЛ, характерной для отечественных ВОЯР, объем этой информации достиг 5 тысяч зарегистрированных в экспериментах значений КТП, причем для квадратной геометрии ТВС, используемой в зарубежных реакторных установках, этот показатель составил около 12 тысяч кризисных значений теплового потока. Эти также представительные массивы результатов экспериментальных исследований кризисов теплоотдачи в ПК различной геометрии позволили специалистам в области реакторной теплофизики перейти к комплексному анализу и обобщению этих данных с учетом многофакторного характера зависимости величины КТП от определяющих ее режимных параметров процесса теплообмена, а также геометрических характеристик теплообменных устройств АкЗ. В результате систематизации указанных экспериментальных данных на основе анализа теории размерностей, а также методов гидродинамического и теплового подобия процессов теплообмена получена новая информация о существовании наиболее значимых параметров процесса теплообмена, определяющих значения критических тепловых потоков в каналах различной формы. Так, например, установлено, что в гладких трубах значения КТП (обозначение  $q_{кр}$ ) в определяющей степени зависит от таких режимных параметров, как давление  $p$ , а также от значений относительного паросодержания  $X$ , массовой скорости  $G$ , диаметра проходного сечения трубы  $d$  и относительного расстояния  $L_H/d$  от начала обогрева  $L_H$ . В результате было установлено, что указанная зависимость может быть выражена функционалом  $q_{кр} = f(p, G, X, d, L_H/d)$ . Кроме вышеуказанных факторов, была обнаружена зависимость КТП от неравномерности энерговыделения по периметру и длине цилиндрического ПК.

© Г. И. Шараевский, 2018

Применительно к кольцевым каналам, как это показал ряд других работ авторского коллектива ГНЦ ФЭИ (г. Обнинск, Россия), в частности [3 - 5], согласно данным которых перечень параметров, непосредственно определяющих КТП, должен быть дополнен. Показательно, что в этих ПК должна быть учтена зависимость кризиса теплоотдачи от отношения диаметров кольцевого канала  $d_1/d_2$ , а также соотношения тепловых потоков на его поверхностях  $q_1$  и  $q_2$ , причем для эксцентрических кольцевых каналов (ЭКК) следует также учитывать зависимость КТП от величины относительного эксцентриситета  $E = \Delta/(d_2 - d_1)$  (где  $\Delta$  – расстояние между осями двух окружностей поперечного сечения), а также теплового диаметра  $d_h$  (он определяется как  $d_h = 4S/P$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения,  $P$  – обогреваемый периметр канала). В результате для КТП ЭКК должен иметь место функционал

$$q_{\text{кк}} = f(p, G, X, d_h, L/d_h, d_1/d_2, q_1/q_2, E).$$

Кроме того, в последние годы было установлено, что при расчетах КТП в ЭКК следует дополнительно учитывать также геометрические характеристики канала и теплофизические свойства материала формирующих ЭКК труб. Необходимость учета указанных выше факторов связана с тем, что при наличии эксцентриситета возникает существенная теплогидравлическая разверка вдоль периметров теплоотдачи в любом сечении такого канала. Кроме того, ПК этого вида имеет место переток тепла из области ухудшенного теплообмена в узкой части эксцентрического кольцевого зазора (в этой зоне раньше наступает предкризисное состояние) в область с улучшенными условиями теплообмена (в широкой части кольцевого зазора).

Дальнейшие исследования [6, 7] показали, что для ТВС вышерассмотренные функционалы, описывающие значение КТП, должны быть дополнены соответствующей зависимостью, которая характеризует влияние на кризис теплоотдачи ряда различных факторов: геометрических (относительного шага расположения стержней пучка  $S/d$  и  $\Delta Z$  – расстояния между решетками), гидравлических (в первую очередь  $K_f$  – коэффициента гидравлического сопротивления решеток), характеристик дистанционирующих решеток или турбулизаторов потока, а также неравномерностей энерговыделения как по сечению (ее учитывает поправка  $F_{nr}$ ), так и по длине (поправка  $F_{nl}$ ) ТВС. Таким образом, в результате установлено, что КТП в ТВС определяется следующим функционалом

$$q_{\text{сб}} = f(p, G, X, d_h, S/d_h, L/d_h, K_f, Z, d_h/d_{h1}, F_{nr}, F_{nl}),$$

где  $L/d_h$  – относительный продольный шаг расположения дистанционирующих решеток;  $d_h/d_{h1}$  – отношение теплового диаметра ячейки к теплового диаметру сечения канала.

В контексте изложенного следует отметить, что представленные выше общие соотношения в настоящее время принято рассматривать как базовые, поскольку они адекватно характеризуют зависимость КТП от комплекса режимных параметров процесса, включая давление, массовую скорость и балансное массовое паросодержание для каждого из основных типов геометрических форм каналов ВОЯР.

В этой связи следует обратить внимание на тот факт, что при описании КТП в ПК в настоящее время используются два существенно отличающихся подхода к оценке погрешностей экспериментальных данных по кризисам теплоотдачи. При этом необходимо подчеркнуть, что указанные подходы различаются не только комплексами задаваемых при определении КТП расчетных параметров, но также имеют ряд отличительных методических особенностей. Так, согласно первому подходу при расчете КТП используются локальные параметры потока непосредственно в месте возникновения кризиса теплоотдачи. Указанный метод обозначается английской аббревиатурой DSM (direct substitute method), т.е. метод прямой подстановки данных. Согласно второму подходу в расчете задаются параметры потока на входе в канал, а параметры потока в зоне локализации кризиса определяют на основе соотношений теплового баланса (это так называемый метод НВМ – heat balance method – или метод теплового баланса). Характерно, что последний из методических подходов фактически представляет собой метод описания результатов экспериментов по КТП с учетом полной тепловой мощности соответствующего канала.

Показательно, что эти два методических подхода дают расчетные значения, различающиеся в 1,5 - 3 раза (в зависимости от области режимных параметров). В то же время эти подходы тесно связаны между собой и фактически представляют собой различные версии оценки погрешностей определения КТП. Характерно, что погрешность расчета, определяемая по локальным параметрам потока или DSM, превышает оценку НВМ во всех случаях.

Следует отметить, что результаты экспериментальных исследований КТП, как правило, анализируются на основании следующих основных видов представления результатов экспериментальных исследований: а) графиков и номограмм; б) таблиц экспериментальных данных;

в) обобщающих соотношений; г) таблиц обобщенных данных; д) скелетных базовых таблиц с применением корректирующих соотношений.

При этом показателен тот факт, что значительная часть современных методик расчета КТП в практических целях непосредственно использует соотношения, полученные при обобщении отдельных экспериментальных массивов, полученных по результатам работы конкретных исследовательских коллективов. Так, в исследовательских центрах бывшего СССР изучение КТП планомерно велось в ИАЭ, НИКИЭТ, ОКБ "Гидропресс", ЭНИН, ЦКТИ, ФЭИ, МЭИ, ВТИ (Россия), КПИ, ИТТФ и др. (Украина). Показательно, что в большинстве этих коллективов разрабатывались собственные оригинальные методы описания и расчета КТП. Следует отметить, что для достаточно близких областей режимных параметров процесса теплообмена расчетные зависимости различных авторов далеко не всегда давали достаточно хорошо коррелирующие между собой результаты. В то же время актуальные приоритеты обеспечения безопасности в атомной энергетике обусловили необходимость выполнения работ, имевших своей целью известную стандартизацию применяемых методических подходов, которые использовались авторами для описания результатов исследований КТП. Начало такому унифицированному – табличному – подходу к представлению экспериментальных данных было положено в работе [8]. В этой связи показательным примером успешной реализации такого стандартизованного подхода, развитого на основе международной кооперации отечественных и зарубежных исследовательских центров, явилось создание единой версии базовой скелетной таблицы КТП в цилиндрических каналах, которая была впервые опубликована в работе [9]. В указанной базовой таблице для труб представлена зависимость КТП от режимных параметров при внутреннем омывании водным теплоносителем цилиндрического канала со стандартным диаметром 8 мм. Показательно, что влияние теплового диаметра трубы в указанной базовой таблице экспериментальных данных учитывается на основе использования поправочной функции  $F(d) = [d_h/8]^n$  (в случае использования отличного от указанного стандартизованного диаметра, а именно  $d_h$ , выражен в миллиметрах), в качестве нормировочного линейного размера используется тепловой диаметр  $d_h = d_r$  (очевидно, что при обогреве ПК только на части периметра поперечного сечения тепловой диаметр канала может существенно отличаться от гидравлического). В этой связи следует отметить, что использование указанной поправочной функции

явилось достаточно продуктивным, о чем свидетельствуют, например, экспериментальные данные, которые приведены на рис. 1. Указанные подходы позволили наметить пути к разработке общей методологии описания данных по КТП и перейти к разработке базовых таблиц для расчета кризисов теплоотдачи не только для труб, но и для каналов сложной геометрии.

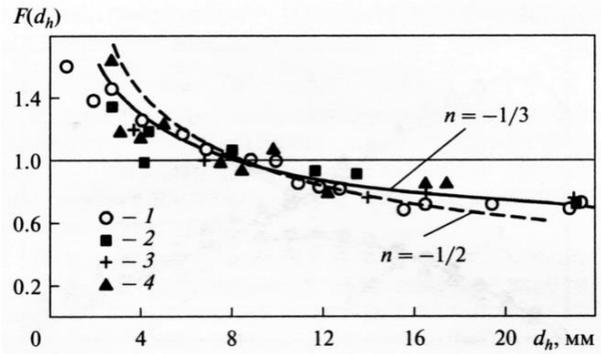


Рис. 1. Пример обобщения результатов экспериментальных данных с использованием поправочной функции на тепловой диаметр канала [2]. Виды геометрии: 1 - трубы; 2 - кольцевые с наружным обогревом; 3 - кольцевые с внутренним обогревом; 4 - треугольные сборки стержней.

В этой связи в настоящее время представляется возможным констатировать, что в результате усилий, предпринятых специалистами по реакторной теплофизике в ведущих ядерных центрах мира, на основе опыта создания базовых таблиц экспериментальных данных по КТП были получены обобщенные, осредненные и сглаженные зависимости (тренды) для описания кризисов кипения. При этом указанные тренды достаточно адекватно отражают реальные экспериментальные закономерности изменения предела форсировки процесса теплоотдачи в основных видах базовых геометрий ПК от режимных параметров. Показательно, что таблицы осредненных данных могут быть использованы не только для целей теплогидравлического расчета АкЗ, но также применяться для целей верификации значений КТП, полученных различными авторами. Последние, как известно, имеют существенный разброс, обусловленный влиянием ряда объективных факторов (которые всесторонне проанализированы в монографии [10]). Следует отметить, что при создании базовых расчетных таблиц КТП в последние годы были выявлены, в частности, неисследованные области режимных параметров, которые в настоящее время не описаны никакими экспериментальными данными. Указанное обстоятельство явилось отправной точкой для расширения фронта дальнейших экспериментальных исследований.

Так, например, было установлено, что таблицы для труб при условии введения известных поправок могут быть использованы в качестве основы для описания КТП не только в цилиндрических, но и в каналах со сложной формой теплоотдающей поверхности. При этом таблицы для труб стали использоваться во многих зарубежных теплогидравлических расчетных кодах (ТГРК), например в коде RELAP, для расчета КТП в ТВС. При этом следует отметить, что согласно результатам анализа, выполненного в работах [10 - 12], экстраполяция данных базовых таблиц по КТП в цилиндрических каналах при использовании современных ТГРК для расчетов кризисов теплоотдачи в существенно отличной от труб геометрии ТВС должна выполняться с известной осторожностью. Наглядной иллюстрацией такого несоответствия может служить приведенная в работе [2] диаграмма эффекта пучка, определяющая допустимые границы такой экстраполяции.

Кроме того, при анализе экспериментов по кризисам теплоотдачи в трубах была установлена зависимость критического теплового потока от величины относительного расстояния до места кризиса от входа в канал ( $Z/d$ ) (как правило,  $Z = L_h$ ). Эта поправка призвана учесть ослабление влияния входных условий, а также стабилизацию гидродинамического и теплового пограничных слоев.

Завершая изложение определяющих методических особенностей расчета КТП в цилиндрических каналах и переходя к рассмотрению методологии расчета кризисов теплоотдачи в ПК кольцевой геометрии, которые достаточно широко используются в транспортных ядерно-энергетических установках, необходимо отметить следующее. Обычно принято считать, что кольцевые каналы можно рассматривать в качестве некоторой переходной геометрии, занимающей промежуточное положение между трубами и стержневыми сборками ТВЭЛ. В свое время эксперименты по определению КТП в концентрических кольцевых каналах (ККК) позволили выявить влияние кривизны поверхности поперечного сечения канала на КТП. Оказалось, что значения критического теплового потока в таких каналах близки к значениям КТП в трубах, но при условии выполнения соотношения дополнительного учета фактической величины кризисного паросодержания

$$X_{ККК} = X_{тр} + \Delta X,$$

где  $\Delta X$  – поправка на смещение величины балансного паросодержания, при котором наступает кризис теплоотдачи в ККК. Следует отметить,

что изменение указанной величины кризисного паросодержания для выпуклых и вогнутых поверхностей существенно различно и зависит от величины безразмерного параметра кривизны  $C_0 = \delta/r(\delta$  – толщина теплового пограничного слоя;  $r$  – радиус кривизны теплоотдающей поверхности). При этом указанный параметр определяется как

$$\Delta X = \pm 0,05 C_0^2.$$

С учетом этой поправки КТП критическая мощность в ККК является следующим функционалом:

$$Q_{ККК} = Q_{тр}(p, G, d_h, X_0 = X + \Delta X).$$

Как отмечается, например, в работе [2], указанное выше смещение паросодержания является результатом противоположного влияния на величину КТП степени кривизны вогнутой и выпуклой теплоотдающих поверхностей кольцевого канала. При этом указанное влияние является результатом воздействия на паровую фазу тангенциальных пульсаций скорости, которые способствуют сепарации паровой фазы в соответствующую сторону по отношению к стенке теплоотдающей поверхности в зависимости от знака кривизны поверхности теплообмена.

Кроме того, в последние годы в ККК дополнительно обнаружен факт влияния на КТП собственно схемы обогрева. Так, например, установлено, что различие КТП при одностороннем и двустороннем обогреве может быть довольно существенным (до 30 %), причем зависит оно от соотношения значений тепловых потоков на соответствующих поверхностях ККК. С целью адекватного эмпирического описания КТП в ККК при двустороннем обогреве было введено понятие теплового пограничного слоя (ТПС) – слоя жидкости, примыкающего к теплоотдающей поверхности, через который и отводится тепло в соответствующем направлении. Показательно, что толщина указанного слоя является пропорциональной соответствующей величине отводимого от теплоотдающей поверхности теплового потока.

После изложенной краткой характеристики основных методологических особенностей расчетного определения КТП в цилиндрических и кольцевых ПК необходимо конкретизировать ряд определяющих подходов к анализу экспериментальных данных по кризисам теплоотдачи в ЭКК, изучение которых связано с влиянием возможного нарушения в ККК его исходной геометрии, что может иметь место также и в ТВС.

Для практической реализации эффективного анализа таких данных в работах [1, 3, 5] при пер-

вначале анализе было введено понятие элементарной тепловой ячейки в ЭКК. Согласно этому подходу полное поперечное сечение указанного ПК было предложено разделить на несколько характерных теплогидравлических ячеек (ТГЯ), ограниченных теплоотдающей стенкой, линиями симметрии (в ЭКК это линии эксцентрического смещения) и некоторой условной линией, разделяющей ТПС, прилегающие к разным теплоотдающим стенкам. Такие ячейки характеризуются тремя основными геометрическими параметрами: кривизной (характеризуется параметром  $C_0$ ), неравномерностью теплового пограничного слоя вдоль периметра ячейки (параметр  $Y_0$ ) и протяженностью сечения ячейки (параметр  $L_0$ ). Методика определения указанных величин изложена в указанных выше работах. Характерно, что по мере увеличения эксцентриситета ЭКК на первый взгляд можно ожидать физического проявления влияния эффектов теплопроводности и размера теплоотдающих конструкций вследствие проявления тепловой сопряженности процесса теплообмена в таком теплообменном устройстве. Показательно, что целенаправленные исследования теплофизики подобных процессов до настоящего времени вообще не предпринимались. В то же время характерные физические эффекты, выявленные рядом авторов при анализе и обобщении экспериментальных данных по КТП для кольцевых каналов, позволили более обоснованно подойти к изучению ряда специфических теплогидравлических эффектов, которые в полной мере проявили себя не только в ЭКК, но и в стержневых сборках ТВЭЛ.

В первую очередь изложенное следует отнести к новому физическому эффекту – эффекту пучка, влияние которого было установлено и всесторонне проанализировано специалистами ГНЦ РФ ФЭИ в ряде работ, таких, например, как [2, 3, 6]. С позиций этих работ в рассматриваемом далее контексте анализа теплогидравлической специфики ТВС относительно значений КТП в каналах простой геометрической формы, в особенности цилиндрической, наглядной иллюстрацией степени влияния эффекта пучка на величину этого аварийного параметра в стержневых сборках ТВЭЛ может служить рис. 2. Показательно, что указанный рисунок позволяет получить достаточно полное представление относительно основных физических закономерностей проявления ряда определяющих физических особенностей эффекта пучка в области кризисных значений параметров реакторного канала. Кроме того, эта иллюстрация убедительно свидетельствует о негативном влиянии этого эффекта на используемые в настоящее время основные

характеристики структурной надежности ЯР, такие как величина КТП.

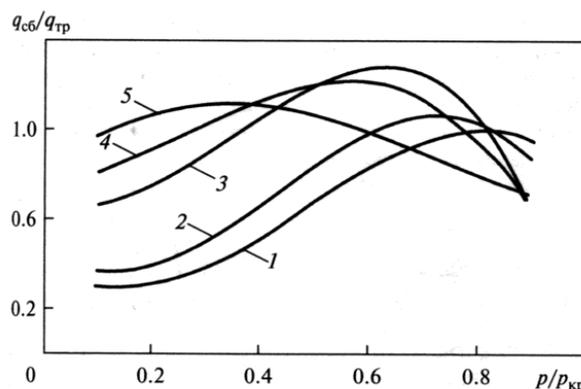


Рис. 2. Физическое проявление эффекта пучка в ТВС [2].  $p_{кр}$  – критическое давление; значения массовой скорости,  $кг/(м^2·с)$ : 1 - 500; 2 - 1000; 3 - 2000; 4 - 3000; 5 - 5000.

Указанное обстоятельство фактически предопределяет особую роль и значение тех перспективных исследований, которые должны быть выполнены в процессе комплексного анализа основных физических проявлений установленного в последние годы факта существенного снижения величины КТП в ТВС относительно значений критической тепловой нагрузки в цилиндрических ПК. Это непосредственно следует из характера кривых на рис. 2. Должен быть отмечен также и приоритетный характер выполнения неотложных работ по разработке и внедрению методов возможно более полного учета пространственного (в первую очередь двумерного) характера распределения массовой скорости и энтальпии теплоносителя по сечению ТВС. В особой мере изложенное следует отнести к вопросам обеспечения безопасности реакторных установок применительно к условиям течи из первого контура и связанным с такого вида аварией переходом к опасным с точки зрения возникновения кризиса теплоотдачи областям теплогидравлических параметров в АкЗ ЯР. В этой связи в настоящее время представляется возможным утверждать, что вышеуказанный эффект пучка обусловлен в первую очередь взаимным влиянием параллельных потоков, движущихся в ТГЯ ТВС в предкризисной области. Показательно, что указанный эффект катастрофического снижения величины КТП в ряде характерных областей теплофизических параметров непосредственно предопределяется именно сложной геометрической формой теплоотдающей поверхности ТВС. При этом определяющим в этом контексте является тот факт, что значения КТП в сборках (как в системах параллельных каналов) и в цилиндрических трубах начинают при некоторых услови-

ях различаться на сотни процентов. С этих позиций следует обратить внимание на следующие важные обстоятельства. Во-первых, в большинстве версий современных ТГРК для выполняемых расчетных оценок величины фактического значения КТП в АкЗ ВОЯР в настоящее время практически безальтернативно используются эмпирические зависимости для определения КТП исключительно в трубах. Во-вторых, кардинальные физические отличия динамики предаварийных ТГП непосредственно в предкризисной зоне для двух существенно различных геометрических видов ПК: труб и стержневых сборок ТВЭЛ – объективно обуславливают необходимость комплексного анализа и всестороннего учета эффекта пучка именно при решении задач разработки адекватных вычислительных оценок надежности АкЗ современных энергетических ВОЯР.

Иными словами, при описании кризиса теплоотдачи в стержневых сборках ТВЭЛ следует учитывать в первую очередь взаимодействие параллельных потоков теплоносителя, движущихся в характерных теплогидравлических ячейках пучка. Кроме того, всестороннему учету в рассматриваемом случае подлежат также эффекты, которые обусловлены влиянием геометрических особенностей поперечного сечения характерных ТГЯ ТВС. Так, в ряде работ, таких, например, как [6, 7], была экспериментально установлена существенная зависимость величины КТП от относительного шага и схемы расположения стержней (треугольная или квадратная решетки), неравномерность обогрева по периметру ячеек соответствующей сборки. Выполненный в этом направлении системный анализ достоверных экспериментальных данных по КТП в ТВС, полученных в ряде ведущих исследовательских центров, обеспечил необходимые предпосылки для достаточного точного (с точки зрения практических нужд современного реакторостроения) описания значений КТП в пучках стержней. Так, базовые таблицы и системы поправочных функций для основных типов сборок ТВЭЛ приведены в работах [13 - 15]. Показательно, что в результате цикла этих исследований формула для расчета КТП, согласно данным авторов указанных работ, которая включает соответствующие поправки для ТВС с треугольной геометрией решетки ТВЭЛ, приобрела следующий вид:

$$q_{тр.сб} = q_{таб} F_{dh} F_{Sd} F_L F_{kf} F_{hh} F_f F_{nr},$$

где  $q_{таб}$  принимается по сформированным таблицам для базовых конструкций ТВС [13]. В приведенном соотношении  $F_{dh} = [d_h/(9,36)]^{1/3}$  – поправочная функция на тепловой диаметр каждой

ячейки конкретной сборки;  $F_{Sd}$  – поправочная функция на относительный шаг расположения стержней, причем при значениях  $S/d \leq 1,1$  (указанный параметр  $S/d$  учитывает кривизну, протяженность, а также геометрические особенности ТГЯ) имеет место  $F_{Sd} = 0,82 - 0,7 \exp[-35(S/d - 1)]$ , а при  $S/d > 1,1$  необходимо использовать функцию  $F_{Sd} = 0,20 + 0,575 S/d$ . Характер изменения параметра  $S/d$  приведен на рис. 3. Параметр  $F_L = 1,04 - 0,3 \exp(-0,01 L_h/d_h)$  представляет собой поправочную функцию, которая учитывает влияние входных условий и выражена через относительное расстояние от места кризиса до входа в ТВС  $L_h/d_h$ . В представленном выше соотношении для расчета КТП с поправочными функциями  $F_{kf} = 1 + A \exp(-0,1 L_h/d_h)$  представляет собой поправку для учета влияния эффекта перемешивания теплоносителя между ТГЯ, а также для учета гидродинамического влияния дистанционирующих решеток, имеющими коэффициент сопротивления  $K_f$ , где  $A = 0,9 K_f^{0,5} (G/1000)^{0,2}$ . Характер изменения вышеуказанной поправки  $K_f$  представлен на рис. 4). Функция  $F_{hh} = d_h/d_{h1}$  представляет собой поправку, которая учитывает эффект взаимного влияния ТГЯ при равномерном по сечению ТВС энерговыделении ТВЭЛ, причем  $d_{h1}$  – тепловой диаметр рассматриваемой сборки с табличными значениями КТП;  $F_f$  – функция, описывающая влияние продольной неравномерности энерговыделения (форм-фактор);  $F_{nr}$  – функция, учитывающая теплогидравлическую неравноценность ячеек ТВС.

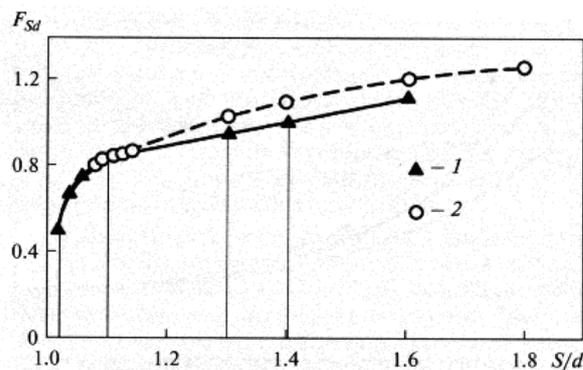


Рис. 3. Характер изменения поправочной функции  $F_{Sd}$  от относительного шага решетки ТВЭЛ [10]. 1 - для треугольной решетки; 2 - для квадратной решетки.

Анализ представленного на рис. 3 характера изменения поправочной функции  $F_{Sd}$  в зависимости от относительного шага решетки ТВЭЛ свидетельствует о том, что величина КТП растет по мере увеличения относительного шага стержней. Считается, что это связано с теплогидравлическим эффектом гомогенизации структуры теплового пограничного слоя по периметру сечения

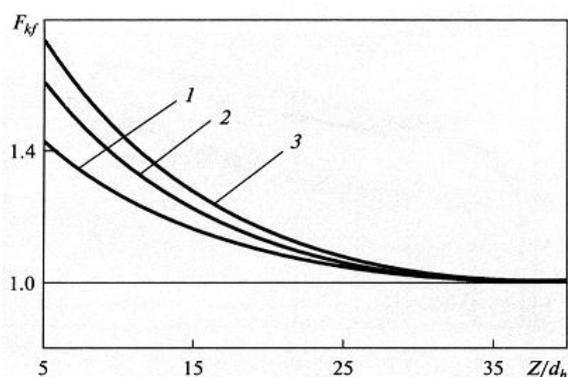


Рис. 4. Характер зависимости поправочной функции  $F_{kf}$  от относительного расстояния до ближайшей дистанционирующей решетки ТВЭЛ [10]. Значения коэффициента гидравлического сопротивления  $K_f$ : 1 - 0,5; 2 - 1,0; 3 - 1,5.

ТВС, который имеет место также и в ККК, в которых отмечается естественное уменьшение азимутальных перетоков теплоты в пределах ТГЯ. Таким образом, представленная на рис. 3 зависимость величины поправочного коэффициента  $F_{sd}$  в свою очередь иллюстрирует зависимость значений КТП в ТВС от относительного шага, что можно рассматривать как результат комплексного влияния кривизны  $C_0$ , параметра неравномерности теплового пограничного слоя ячейки  $Y_0$  и параметра протяженности сечения ячейки  $Z_0$ , которые одновременно трансформируются по мере изменения относительного шага  $S/d$ . Физически поправочная функция  $F_{kf}$  на рис. 4 описывает комплексное влияние на величину КТП зоны кризисной теплоотдачи с учетом относительного расстояния от этой зоны до ближайшей дистанционирующей решетки в стержневой сборке ТВЭЛ.

Необходимо подчеркнуть, что при плотной упаковке ТВЭЛ, которая реализуется в ТВС с треугольной решеткой, имеет место также непосредственное физическое воздействие на КТП теплофизических свойств топливного материала ТВЭЛ, определяемое его эффективной теплопроводностью. Так, например, при снижении коэффициента теплопроводности топливной композиции имеет место существенная неравномерность распределения температур по периметру ТГЯ, в особенности в предкризисных режимах. Очевидно, что подобная неравномерность непосредственно инициирует возникновение кризисных явлений в соответствующей зоне ТВС. Следует также отметить, что применяемый в настоящее время табличный метод описания КТП в ТВС, тем не менее, не позволяет эффективно описать эффект влияния эффективной теплопроводности топливной композиции ТВЭЛ на значение КТП.

Как известно, при конструировании ТВС ре-

акторов ВВЭР должно быть предусмотрено размещение дистанционирующих решеток, которые должны обеспечивать не только геометрическую стабильность структуры ТВС, но также и способствовать перемешиванию потока теплоносителя путем его турбулизации, способствуя при этом повышению КТП. Вместе с тем на практике в ТВС с увеличенным шагом дистанционирующих решеток может иметь место существенное нарушение исходной геометрии ТГЯ, которое оказывает негативное влияние на эксплуатационный ресурс стержневой сборки, существенно снижая при этом величину проектной величины КТП. Указанный эффект проанализирован в работе [11]. Следует также обратить внимание и на то обстоятельство, что интенсификация поперечного перемешивания потока должна быть реализована в условиях существенной теплогидравлической разверки в поперечном направлении ТВС (при отличающемся энерговыделении в соседних ТВЭЛ). В этих условиях турбулизирующее влияние решеток, как показано в работе [11], способствует увеличению величины КТП. В этой связи в реакторостроении эффективным признаком применения решеток с повышенным коэффициентом сопротивления, а также с уменьшенным их шагом в верхней (выходной) части реакторного канала.

В настоящее время в большинстве методических подходов к расчетному определению значений КТП в основных типах геометрий ПК в качестве определяющих параметров процесса кризисного теплообмена в канале соответствующей геометрии принято использовать осредненные значения теплогидравлических параметров. Последние, как известно, для соответствующей аксиальной координаты зоны возникновения кризиса теплоотдачи вычисляются на основе уравнений теплового баланса. В то же время системный анализ представительных массивов накопленных экспериментальных данных по КТП в каналах сложной геометрической формы, в первую очередь в стержневых сборках ТВЭЛ, свидетельствует о следующем. В процессе повышения тепловой мощности ТВС возникновение кризиса теплоотдачи регистрируется именно в той наиболее теплонапряженной ТГЯ исследуемого пучка, в которой значения локальных кризисных параметров потока являются существенно отличными от среднепучковых (балансных значений этих параметров в сечении пережога сборки). Как отмечается в этой связи в работе [1], определяющими физическими факторами, которые непосредственно обуславливают отмеченное выше несоответствие локальных кризисных параметров ТГЯ их среднепучковым значениям, являются: а) тепловая разверка; б) нерав-

номерность энерговыделения в ТВЭЛ; в) наличие нестандартных ячеек в ТВС. Дополнительным подтверждением справедливости вышеуказанного заключения может служить, в частности, и хорошо известный в реакторной теплофизике факт существенного увеличения уровня экспериментальной погрешности определения величины КТП в стержневых сборках в случае использования в процессе обработки данных именно среднепучковых, а не локальных теплогидравлических параметров. В этой связи представляется необходимым отметить следующее. Физически обоснованной альтернативой применению расчетов КТП в ТВС на основе среднепучковых характеристик процесса теплообмена в кризисном сечении соответствующей сборки является использование именно локальных теплогидравлических параметров непосредственно в наиболее теплонапряженной ТГЯ. В то же время следует особо отметить тот факт, что экспериментальное определение вышеуказанных локальных кризисных параметров при проведении экспериментов по КТП в ТВС существенно затруднено, как это подтверждается экспериментальными данными, представленными в работе [1].

В связи с отмеченными выше актуальными проблемными вопросами современной реакторной теплофизики, связанными с получением адекватных оценок тепловых потоков, которые обуславливают возникновение аварийных режимов теплоотдачи в ТВС ВОЯР, в последние годы и получил развитие метод расчета КТП в ТВС на основе ТГЯ. Принципиальные методические положения этого подхода к анализу данных по КТП, а также полученные на основе реализации этого метода результаты локальных измерений теплогидравлических параметров в основных видах характерных ТГЯ в ТВС рассмотрены в монографиях [1, 10]. Расчетная схема указанного метода состоит в следующем. Прежде всего, поперечное сечение ТВС условно представляется в виде характерных ТГЯ, в частности стандартных и нестандартных. Показательно, что стандартная ячейка физически представляет собой геометрически правильное по форме сечение симметрично обогреваемого канала (стандартные диаметры ТВЭЛ и такой же шаг их расположения в решетке, причем все стержни имеют равное энерговыделение). Очевидно, что в подобной стандартной ячейке тепловой диаметр равен гидравлическому  $d_h = d_r$ . Следует отметить, что к стандартным ячейкам обычно относят и ТГЯ с неравномерным обогревом по периметру в случае, если указанная неравномерность достаточно ограничена. К нестандартным ячейкам обычно относят ТГЯ с существенно неравномерным энерговыделением в

формирующих эту ячейку стержнях. Кроме того, этими ТГЯ являются ячейки с иной, чем стандартная, формой поперечного сечения (таковы, например, ячейки, сопредельные с обечайкой ТВС). В таких нестандартных ячейках, как правило, тепловой диаметр не равен гидравлическому:  $d_h \neq d_r$ . В этой связи следует также отметить, что и в цилиндрических каналах с неравномерным по периметру обогревом тепловой диаметр не равен гидравлическому, т.е.  $d_h > d_r$ . Так, например, в кольцевых каналах с односторонним обогревом тепловой диаметр может в 2 раза превышать гидравлический. Следует также учитывать, что ТПС в каналах с большим тепловым диаметром имеет увеличенную толщину, а интенсивность теплоотдачи в таких каналах имеет тенденцию к снижению по мере увеличения толщины ТПС. Очевидно, что условия теплоотдачи в момент кризиса теплоотдачи существенно ухудшаются при более высоких значениях теплового диаметра (а значит, и увеличении толщины ТПС), в силу чего величина КТП снижается. Это подтверждается данными работы [2], в которой исследовался КТП в кольцевых каналах при одностороннем и двустороннем обогреве. Так, в ККК при одностороннем обогреве (с увеличенным в 2 раза тепловым диаметром при идентичных гидравлических диаметрах) КТП снижался на 30 % по сравнению с двусторонним обогревом. В то же время в экспериментах ФЭИ по исследованию КТП в трубах, которые также обобщены в работе [2], отмечалось, что при неравномерном по периметру энерговыделении КТП может быть не только меньше, но и больше, чем в равномерно обогреваемых трубах. Последнее позволяет сделать вывод о том, что КТП в нестандартных ячейках отличается от КТП в стандартных ячейках при одинаковых значениях режимных параметров.

По результатам выполненных в последние годы экспериментов было установлено, что если в ТВС имеются неравноценные в теплогидравлическом отношении ТГЯ, возможна ситуация, когда условия омывания одного и того же ТВЭЛ, который физически относится к сопредельным (причем существенно различным в теплогидравлическом отношении) ячейкам, существенно различаются. Очевидно, что в подобных теплогидравлических условиях обязательному учету подлежат перетоки теплоты в соответствующем сечении ТВС, которые обусловлены не только поперечным перемешиванием теплоносителя, но также и процессами теплопередачи в топливной композиции. В этой связи следует отметить, что в контексте конкретизированной выше сопряженной физической постановки задача о возникновении кри-

зиса теплоотдачи в ТВС с неравноценными ТГЯ и несимметричным охлаждением ТВЭЛ в таких ячейках до настоящего времени фактически не решена. В этой связи в работе [2], в частности, обращается внимание на достаточно парадоксальный физический факт, сущность которого состоит в следующем. В том случае, если на одной из сторон ТВЭЛ возникли предкризисные условия и происходит повышение температуры его оболочки, отмечается интенсификация перетоков теплоты к той стороне топливного стержня, которая достаточно эффективно омывается теплоносителем в ТГЯ с меньшей тепловой напряженностью. Показательно, что в этих теплогидравлических условиях отмечается увеличение величины КТП в тех ТВС, которые имеют подобные несимметрично охлаждаемые ТВЭЛ. Должно быть отмечено и то обстоятельство, что предел форсирования процесса теплообмена в такой несимметрично охлаждаемой сборке определяется локальными теплогидравлическими условиями возникновения кризисных ТГП именно в ячейке с меньшей тепловой напряженностью.

В настоящее время можно считать окончательно установленным [1, 10], что одним из основных физических факторов, которые определяющим образом влияют на формирование условий возникновения кризиса теплоотдачи при кипении на теплоотдающей поверхности натуральных ТВЭЛ, является аксиальная неравномерность энерговыделения в реальных каналах охлаждения АкЗ ЯР. В реакторной теплофизике указанный эффект получил название форм-фактора. При этом также можно считать, что указанный теплофизический фактор оказывает непосредственное влияние не только на величину КТП, но также и на область локализации кризисных явлений по длине ТВЭЛ. В этой связи следует особо отметить то обстоятельство, что разработанные за последние годы и широко применяемые в реакторостроении инженерные методики оценок теплогидравлической надежности АкЗ в ряде случаев не могут обеспечить всесторонний учет влияния на величину КТП именно форм-фактора. Указанные методики не могут быть признаны универсальными, поскольку они получены эмпирическим или полуэмпирическим способом и применяются как поправки к существующим расчетным зависимостям и методикам для равномерного обогрева соответствующих каналов. Следует подчеркнуть, что указанные экспериментальные данные и соответствующие поправки могут считаться адекватными и пригодными для описания только для достаточно узкого диапазона режимных параметров и соответствующего этому диапазону некоторого массива экс-

периментальных данных. Очевидно, что практическое использование любого подобного форм-фактора, введенного тем или иным автором для описания собственных массивов данных (особенно для различных эпюр энерговыделения) требует дополнительного расчетного анализа.

Следует отметить, что подавляющее большинство разработанных к настоящему времени расчетных рекомендаций по учету форм-фактора основываются на фундаментальной работе Л. Тонга [16]. На основе аналитического решения уравнения энергии для перегретого пристенного слоя жидкости у теплоотдающей поверхности ТВЭЛ с использованием осредненных теплофизических параметров этого слоя в указанном исследовании было получено соотношение для определения значения соответствующей поправки для величины КТП, т.е. форм-фактора

$$F_T^{-1} = \frac{C_L}{Q_L^* [1 - \exp(-C_L L_1)]} \int_0^{L_1} Q^*(z) \exp[-C_L(L_1 - z)] dz,$$

где  $z$  – координата рассматриваемой зоны кризиса от входа потока;  $Q^*(z) = q(z)/q_{cp}$  – относительный тепловой поток в точке  $z$ ;  $q(z)$  – тепловой поток в точке  $z$ ;  $q_{cp}$  – средний по длине тепловой поток;  $Q_L^*$  – относительный тепловой поток в точке  $z = L_1$ ;  $L_1$  – расстояние от точки начала поверхностного кипения до сечения кризиса.

В приведенной выше зависимости для расчета  $C_L$  используются эмпирические соотношения, например, следующего вида:

$$C_L = 0,286(1 - X)^{7,82}(G \cdot 10^{-3})^{-0,458},$$

где  $X$  – паросодержание в месте кризиса;  $G$  – массовая скорость.

В этой связи следует отметить, что такой подход обеспечивает возможность учета как предыстории потока в развитии кризиса теплоотдачи (вышеуказанная методика НВМ), так и влияния локальных параметров на его возникновение (подход DSM). Обычно учет поправки на неравномерность тепловыделения по длине осуществляется как

$$q_{н\text{ер}} = q_p F_f,$$

где  $q_{н\text{ер}}$  и  $q_p$  – величина КТП при неравномерном и равномерном энерговыделении;  $F_f$  – поправка для учета форм-фактора.

При этом функция  $F_f$  должна была удовлетворять трем необходимым и достаточным условиям: а) быть универсальной по отношению к форме эпюры энерговыделения; б) иметь пределом единицу при близкой к равномерной форме эпюры энерговыделения; в) возможно более точно

описывать имеющиеся экспериментальные данные как по значениям КТП, так и по месту возникновения кризиса.

В результате автором работы [16] было получено выражение для расчета форм-фактора

$$F_f = F_{QM} K^{0,5},$$

где  $K = F_1/F_2$ ;  $F_1$  и  $F_2$  – поправочные функции [16], рассчитанные для случаев неравномерного и равномерного энерговыделения в ПК;  $F_{QM} = 1,56 - 0,69K_Z + 0,11K_Z^2 + 0,02K_Z^3$ ;  $K_Z$  – коэффициент продольной неравномерности энерговыделения ( $K_Z = q_{\max}/q_{\text{ср}}$ ).

Следует также отметить, что именно последнее из приведенных соотношений автором работы [2] было верифицировано для простейшего случая равномерного энерговыделения и подтвердило свою адекватность. Очевидно, что требуются дальнейшие экспериментальные исследования в направлении верификации этих соотношений применительно к более сложным, характерным для практики эксплуатации ВОЯР, профилям аксиального энерговыделения в АкЗ.

В результате рассмотрения вышеизложенных актуальных вопросов реакторной теплофизики представляется необходимым конкретизировать основные задачи совершенствования методологии расчетных оценок величины КТП в ВОЯР, которые направлены на повышение точности указанных оценок и формулируются следующим образом.

1. При анализе расчетных данных по КТП в каналах ВОЯР, который является важной составной частью комплекса работ в обоснование безопасности реактора ВВЭР действующих и проектируемых АЭС приоритетной следует считать необходимую для обеспечения надежности этого анализа информацию относительно типов методических подходов (DSM или НВМ), использованных авторами соответствующих экспериментальных корреляций при обработке результатов экспериментов по кризисам теплоотдачи в ПК. В этой связи результаты расчетов с использовани-

ем ТГРК должны быть уточнены на основе введения соответствующих поправок.

2. Базовые таблицы экспериментальных данных по КТП в ПК цилиндрической геометрии в целом достаточно адекватно отражают реальные физические закономерности возникновения кризиса теплоотдачи в основных видах базовых геометрий, включая стержневые сборки ТВЭЛ, а также влияние на эти закономерности основных режимных параметров процесса теплообмена. Вместе с тем значения КТП в цилиндрических ПК могут быть использованы для адекватных оценок этого параметра в ТВС при условии дополнительного учета фактической величины паросодержания ( $X_{\text{тр}} + \Delta X$ ), которое достигается к моменту кризиса в соответствующей локальной зоне.

3. Факт существенного снижения реальной величины КТП в ТВС по сравнению с величиной этого параметра в цилиндрических каналах для ряда областей диапазона режимных параметров потока теплоносителя, или эффект пучка, можно считать окончательно установленным. Тем не менее в большинстве современных версий ТГРК при определении величины КТП в АкЗ ВОЯР по-прежнему используются эмпирические корреляции для цилиндрических каналов без учета вышеуказанного эффекта, что не позволяет адекватно оценить располагаемое значение запаса до наступления кризиса теплоотдачи.

4. В большинстве выполняемых в настоящее время расчетных оценок безопасности реакторов ВВЭР на основе определения величины КТП не предполагается всесторонний учет форм-фактора для различных видов аксиальной неравномерности энерговыделения в ТВС, что также снижает достоверность получаемых результатов.

В заключение следует отметить, что в широком контексте современная теплофизическая проблематика особенностей эксплуатации ядерных энергоблоков в штатных и нерегламентных режимах, наряду с вышеупомянутыми работами [1, 10, 11], обобщена также в двух недавних монографиях нашего авторского коллектива [17, 18].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.А. Ключников и др. *Теплофизика безопасности атомных электростанций* (К.: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010) 484 с.
2. В.П. Бобков. Критический тепловой поток при кипении воды в каналах. Современное состояние, характерные закономерности, нерешенные проблемы и пути их решения. *Теплоэнергетика 2 (2015) 10*.
3. В.П. Бобков, В.Н. Виноградов, О.А. Зятнина, Н.В. Козина. Метод оценки кризиса в каналах сложного профиля сечения. *Теплоэнергетика 3 (1995) 37*.
4. В.П. Бобков, О.А. Судницын, М.О. Судницына. Численное и аналитическое описание критических тепловых потоков в каналах. *Атом. энергия 84(2) (1998) 114*.
5. В.П. Бобков. Метод описания и расчета критических тепловых потоков в кольцевых каналах в широком диапазоне параметров. *Теплоэнергетика 7 (2012) 1*.
6. В.П. Бобков, В.Н. Виноградов, П.Л. Кириллов, И.П. Смогалева. Критические тепловые потоки в

- треугольных пучках стержней (скелетная таблица, версия 1997 г.). Теплоэнергетика 11 (1999) 54.
7. В.П. Бобков и др. Обоснование и верификация модели кризиса теплообмена в пучках стержней теплогидравлического кода КОРСАР. Теплоэнергетика 3 (2003) 35.
  8. В.Е. Дорошук. *Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах*. 2-е изд. (Москва: Энергоатомиздат, 1983) 120 с.
  9. D.C. Groeneveld et al. The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes. *Nucl. Eng. and Design* 163 (1996) 1.
  10. А.В. Носовский и др. *Теплофизика ресурса ядерных энергоустановок* (К.: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2017) 624 с.
  11. А.А. Ключников и др. *Теплофизика надежности активных зон* (К.: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2015) 772 с.
  12. Г.И. Шараевский. Методология определения режима начала кипения в ТВС путем анализа акустического шума. *Ядерна та радіаційна безпека* 3(71) (2016) 48.
  13. В.П. Бобков, А.Д. Ефанов, Р.С. Пометько, И.П. Смогалев. Модифицированная таблица для критических тепловых потоков в сборках теплоделяющих стержней в треугольной упаковке. *Теплоэнергетика* 4 (2011) 43.
  14. В.П. Бобков, И.П. Смогалев. Табличный метод описания критических тепловых потоков в сборках ТВЭЛов в квадратной упаковке. *Атом. энергия* 94(5) (2003) 407.
  15. В.П. Бобков, А.Д. Ефанов, И.П. Смогалев, Р.С. Пометько. Таблица для критических тепловых потоков в сборках ТВЭЛов в квадратной упаковке. *Атом. энергия* 99(1) (2005) 33.
  16. Л. Тонг. *Кризис кипения и критический тепловой поток*: пер. с англ. (Москва: Атомиздат, 1976) 100 с.
  17. А.А. Ключников и др. *Теплофизика аварий ядерных реакторов* (К.: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012) 528 с.
  18. А.А. Ключников и др. *Теплофизика поврежденных реакторных установок* (К.: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2013) 528 с.

**Г. І. Шараєвський\***

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: yura.sharayevskij@gmail.com

#### **АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКУ АВАРІЙНИХ ТЕПЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ У КАНАЛАХ ВОДООХОЛОДЖУВАНИХ РЕАКТОРІВ**

Розглянуто сучасні уявлення про фізичний механізм кризи тепловіддачі при вимушеному русі двофазного потоку в каналах, що обігриваються. Проведено аналіз відомих підходів і запропоновано методичні основи розробки та застосування рекомендацій щодо розрахунку та контролю кризи тепловіддачі на АЕС з ВВЕР.

*Ключові слова:* водоохолоджуваний ядерний реактор, двофазний потік теплоносія, криза тепловіддачі.

**G. I. Sharaevsky\***

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: yura.sharayevskij@gmail.com

#### **PROBLEMS OF THE EMERGENCY THERMAL LOAD CALCULATION IN THE CHANNELS OF THE WATER-COOLED NUCLEAR REACTORS**

Representations about the physical mechanism of the heat transfer crisis under forced motion of two-phase flow in heated channels are considered. Analysis of known approaches is carried out and methodical bases of the development and application of recommendations on calculation and control of the heat transfer crisis at NPPs with WWER is proposed.

*Keywords:* water-cooled nuclear reactor, two-phase flow of coolant, heat transfer crisis.

#### REFERENCES

1. А.А. Ключников et al. *Thermophysics of Nuclear Power Plant Safety* (Kyiv: Institute for Safety Problems of NPP, NASU, 2010) 484 p. (Rus)
2. V.P. Bobkov. Critical heat flow at water boiling in channels. Current state, characteristic patterns, unsolved problems and ways to solve them. *Теплоэнергетика* 2 (2015) 10. (Rus)
3. V.P. Bobkov, V.N. Vinogradov, O.A. Ziatnina, N.V. Kozina. Method for estimating the crisis in channels of a complex cross-section profile. *Теплоэнергетика* 3 (1995) 37. (Rus)
4. V.P. Bobkov. A.O. Sudnitsyn, M.O. Sudnitsyna. Numerical and analytical description of critical heat flows in channels. *Atomic Energy* 84(2) (1998) 114. (Rus)
5. V.P. Bobkov. Method for describing and calculating critical heat fluxes in annular channels in a wide range of parameters. *Теплоэнергетика* 7 (2012) 1. (Rus)
6. V.P. Bobkov, V.N. Vinogradov, P.L. Kirillov, I.P. Smogalev. Critical heat fluxes in triangular beams of rods (skeleton table, version 1997). *Теплоэнергетика* 11 (1999) 54. (Rus)

7. V.P. Bobkov et al. Substantiation and verification of the heat exchange crisis model in the beams of the thermo-hydraulic code KORSAR. *Teploenergetika* 3 (2003) 35. (Rus)
8. V.E. Doroshchuk. *Heat Exchange Crises in Boiling Water in Pipes*. 2-nd ed. (Moskva: Energoatomizdat, 1983) 120 p. (Rus)
9. D.C. Groeneveld et al. The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes. *Nucl. Eng. and Design* 163 (1996) 1.
10. A.V. Nosovsky et al. *Thermophysics of NPP Resource* (Kyiv: Institute for Safety Problems of NPP, NASU, 2017) 624 p. (Rus)
11. A.A. Kliuchnikov et al. *Thermophysics of Active Zones Reliability* (Kyiv: Institute for Safety Problems of NPP, NASU, 2015) 772 p. (Rus)
12. G.I. Sharaevsky. Methodology for determining the boiling point in FA by analyzing acoustic noise. *Jaderna ta Radiatsijna Bezpeka* 3(71) (2016) 48. (Rus)
13. V.P. Bobkov, A.D. Efanov, R.S. Pometko, I.P. Smogalev. Modified table for critical heat fluxes in assemblies of fuel rods in triangular packaging. *Teploenergetika* 4 (2011) 43. (Rus)
14. V.P. Bobkov, I.P. Smogalev. Tabular method for describing critical heat flows in square-packed fuel assemblies. *Atomic Energy* 94(5) (2003) 355. (Rus).
15. V.P. Bobkov, A.D. Efanov, I.P. Smogalev, R.S. Pometko. Table for critical heat fluxes in square-packed fuel-element assemblies. *Atomic Energy* 99(1) (2005) 472. (Rus).
16. L. Tong. *The boiling Crisis and the Critical Heat Flux* (Moskva: Atomizdat, 1976) 100 p. (Rus)
17. A.A. Kliuchnikov et al. *Thermophysics of Nuclear Reactor Accidents* (Kyiv: Institute for Safety Problems of NPP, NASU, 2012) 528 p. (Rus)
18. A.A. Kliuchnikov et al. *Thermophysics of Reactor Facilities Damages* (Kyiv: Institute for Safety Problems of NPP, NASU, 2013) 528 p. (Rus)

Надійшла 15.02.2018  
Received 15.02.2018