

**И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Н. И. Шараевская**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ 2-ГО РОДА В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Рассмотрены представления о физическом механизме и признаках наступления кризиса теплоотдачи 2-го рода при восходящем движении пароводяного потока в парогенерирующих каналах.

*Ключевые слова:* высыхание пленки; паросодержание; подавление пузырькового кипения; унос; равновесная кривая; запас по кризису; пленочное кипение.

Результатами ряда известных экспериментальных работ было убедительно показано, что деактивацию центров парообразования при кипении в тонкой пленке в условиях уменьшения ее толщины нельзя объяснить только снижением температуры поверхности, обусловленным интенсификацией теплообмена в тонком слое кипящей жидкости. Известно, что перегревы теплоотдающей поверхности ТВЭЛ в момент подавления кипения не только равны, но в ряде случаев превышают перегревы, соответствующие устойчивому пузырьковому кипению в большом объеме в тех же условиях. Для стекающих пленок жидкости было экспериментально установлено, что существует область режимных параметров, при которых пузырьковое кипение в тонкой пленке жидкости отсутствует, хотя в условиях большого объема устойчивая генерация паровой фазы имеет место.

Известное предположение о том, что кипение жидкости прекращается тогда, когда толщина пленки станет меньше критического размера парового зародыша, безусловно, заслуживает внимания, хотя и требует дополнительной аргументации. Следует упомянуть, что во всех экспериментах с дисперсно-кольцевой структурой двухфазного потока толщина пристенной пленки более чем на порядок превышала величину минимально возможного критического радиуса парового зародыша во впадине микрошероховатости поверхности. Кроме того, следует считать обоснованными также и модельные представления [1], связывающие процесс подавления кипения в движущейся пленке с толщиной ее гидродинамического ламинарного подслоя. Вполне очевидно, что указанный параметр наряду с формированием профиля температуры в этом подслое оказывает определяющее влияние именно на процесс активации потенциальных центров парообразования.

Данные визуализации процесса кипения жидкостных пленок в условиях большого объема убедительно свидетельствуют о специфике процесса генерации паровой фазы в этих условиях. При толщинах пленки воды около 1 мм начинают появляться специфические центры парообразования, обладающие рядом особенностей. Так, если при пленках значительной толщины паровые пузыри зарождаются и растут в фиксированных центрах парообразования, то в более тонких слоях жидкости появляются паровые пузыри, перемещающиеся по теплоотдающей поверхности. Характерно, что новые пузыри этого типа возникают в местах разрушения предыдущих. При этом частота генерации паровых ассоциаций этого типа существенно ниже, чем частота отрыва обычных пузырей. В условиях их разрушения в пленке жидкости возникает характерный «кратер», образующий сухое пятно на поверхности нагрева. Показательно, что этот тип паровых ассоциаций является самым устойчивым к подавлению и всегда прекращает работу последним.

В отличие от обычно практиковавшихся интегрального подхода, при котором экспериментально устанавливается только взаимосвязь между критической плотностью теплового потока  $q_{кр}$  (КТП) и значением паросодержания  $x_{кр}$  в кризисном сечении парогенерирующего канала (ПК), в [2] предложена, в целом, адекватная модель кризиса теплоотдачи применительно к условиям его возникновения в области верхней границы дисперсно-кольцевой стру-

© И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Н. И. Шараевская, 2012

ктуры потока. Отличительной особенностью этой физической модели является использование в ней результатов анализа важнейшей гидродинамической характеристики дисперсно-кольцевого потока, а именно распределения дисперсной влаги между его ядром и пленкой. С этой целью в [2] эффективно использована предложенная Дж. Хьюитом диаграмма уноса, на которой с использованием координат - относительный расход жидкости в ядре потока  $x_3 = G_{\text{ядр}}/G$  в функции от массового паросодержания потока  $x_1$  - изображаются кривая гидродинамического равновесия в условиях адиабатного потока, а также линия полного расхода жидкости в ПК. Характерно, что ордината гидродинамического равновесия на указанной диаграмме уноса соответствует значению относительного расхода жидкости в ядре потока  $x_3$ , а разность ординат общего расхода жидкости и гидродинамического равновесия позволяет получить относительный расход жидкости в пленке  $x_2$ . Вполне очевидно, что сумма значений  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  равна единице.

На рис 1 представлены подобные диаграммы уноса  $x_3 = f(x_1)$ , отражающие физическую модель кризиса теплоотдачи 2-го рода [2] и обобщающие многие экспериментальные результаты, полученные различными исследователями. Эти диаграммы соответствуют некоторым наиболее характерным сочетаниям значений режимных параметров процесса генерации паровой фазы в обогреваемом цилиндрическом ПК (штриховыми линиями представлены участки диаграмм уноса для равновесных условий).

Так, случай, представленный на рис. 1, а, соответствует уменьшению расхода жидкости в пристенной пленке за счет испарения и динамического уноса с ее поверхности, причем кипение в пленке отсутствует. Линия 1 в этом случае имеет такой же вид, как и для равновесного процесса. Образовавшаяся же при паросодержании  $x_{\Delta P}$ , соответствующем кризису гидравлического сопротивления ПК, микропенка в зависимости от режимных параметров высыхает без орошения или с орошением ее каплями, выпадающими из ядра потока. В первом случае процесс высыхания микропенки соответствует горизонтальной линии 2, которая пересекается с линией 3, характеризующей изменение общего влагосодержания в потоке, при паросодержании  $x_{2p}^0$ . Горизонтальное положение линии 2 свидетельствует о том, что количество влаги в ядре потока при высыхании микропенки сохраняется неизменным. В случае высыхания микропенки при одновременном ее орошении кризис теплоотдачи возникает не при  $x_{2p}^0$ , а при  $x_{op} > x_{2p}^0$  (линия 2').

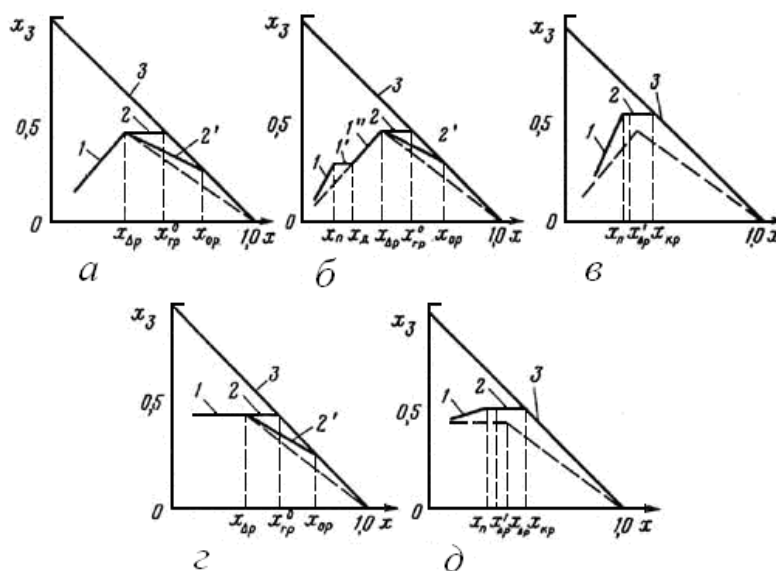


Рис. 1. Структура диаграмм уноса в обогреваемом цилиндрическом ПК для различных теплогидравлических условий в области верхней границы дисперсно-кольцевого режима течения двухфазного парожидкостного потока в соответствии с моделью кризиса теплоотдачи 2-го рода [2]: а, б, в - при наличии динамического уноса; г, д - при отсутствии динамического уноса; а, г - кипения в пристенной жидкостной пленке нет; б, д - на части ПК пленка кипит.

Рис. 1, б соответствует случаю, когда расход в пристенной жидкостной пленке снижается не только за счет испарения и динамического уноса, но также и ввиду пузырькового уноса с ее поверхности. В этих условиях на части трубы пленка кипит,  $q < q_{кр}^0$ . Поскольку при совместном действии на начальном участке трубы испарения и пузырькового уноса жидкая пленка истощается более интенсивно, чем в равновесном процессе, то до подавления кипения при паросодержании  $x_n$  расход в пленке будет изменяться в соответствии с линией 1, более крутой, чем аналогичный участок графика для равновесного процесса. В пределах паросодержаний  $x_n - x_\delta$  из-за чрезмерного утонения пленки динамический унос отсутствует. По этой причине содержание влаги в ядре потока сохраняется неизменным (линия 1' горизонтальна). При  $x > x_\delta$  процесс истощения пленки и возникновения кризиса теплообмена протекает так же, как и в случае, изображенном на рис. 1, а.

Теплогидравлический режим ПК, соответствующий диаграмме уноса на рис. 1, в, в целом, подобен двум предыдущим случаям. Вместе с тем динамический унос влаги из пристенной пленки отсутствует, поскольку  $q > q_{кр}^0$ . Характерно, что в указанном режиме левая ветвь диаграммы представляет собой круто наклонную прямую линию. При паросодержании  $x_n$  она переходит в горизонтальный участок 2, на протяжении которого при  $x'_{\Delta P} < x_{\Delta P}$  образуется микропленка, и при  $x_{кр} < x_{тр}^0$  возникает кризис теплоотдачи 1-го рода. Максимальное количество влаги в ядре потока из-за интенсивного пузырькового уноса при высоком значении  $q$  больше, чем в равновесном потоке.

Рис. 1, г соответствует теплогидравлическому режиму ПК в условиях, когда расход в пленке уменьшается только в результате испарения, а динамический и пузырьковый уносы отсутствуют. Вплоть до паросодержания  $x_{\Delta P}$  количество влаги в ядре потока сохраняется неизменным, и диаграмма на этом участке паросодержаний имеет вид горизонтальной линии. При  $x > x_{\Delta P}$  высыхание микропленки протекает в соответствии с линией 2 (без орошения микропленки) или линией 2' (с орошением микропленки).

В качестве иллюстрации назревшей необходимости определенной корректировки модельных представлений [2] целесообразно рассмотреть диаграмму уноса, представленную на рис. 1, д. Иллюстрируемый ею режим отличается от теплогидравлического режима, представленного на рис. 1, г, тем, что на некотором участке трубы пристенная пленка кипит. Для данного случая кипение в пленке соответствует условию  $q > q_{кр}^0$ . Участок 1 (в пределах существования пузырькового уноса) представляет собой наклонную прямую линию. Согласно [2], при  $x > x_n$  после подавления кипения содержание влаги в ядре потока остается без изменений вплоть до возникновения кризиса теплоотдачи 1-го рода при паросодержании  $x_{кр}$  (линия 2). Таким образом, не только при  $q < q_{кр}^0$ , но и при  $q > q_{кр}^0$  кризис теплоотдачи возникает, согласно модели [2], именно при испарении пристенной микропленки, которая формируется соответственно при  $x_{\Delta P}$  или  $x'_{\Delta P}$ .

Вместе с тем с учетом результатов ряда отечественных и зарубежных экспериментальных работ, посвященных исследованию КТП в ПК в области высоких паросодержаний, представляется необходимым скорректировать некоторые аспекты модельных представлений [2] относительно ряда важных физических особенностей механизма кризисных явлений в дисперсно-кольцевом режиме течения двухфазного потока. Прежде всего, опираясь на результаты экспериментальных исследований процесса кипения в тонких жидкостных пленках, выполненных В. И. Толубинским с сотрудниками [3, 4 и др.], эту корректировку модели [2] необходимо выполнить относительно нижней и средней части области дисперсно-кольцевой структуры. Следует подчеркнуть, что указанная область соответствует диапазону паросодержаний, который простирается от величины  $x_{ндк}$  и заканчивается значением  $x_{\Delta P}$ . В соответствии с модельным подходом [2], указанный диапазон паросодержаний дисперсно-кольцевой структуры соответствует области тепловых потоков  $q > q_{кр}^0$  (рис. 2).

При этом в отношении характерных (с учетом специфики процесса генерации паровой фазы при кипении в тонких жидкостных пленках) физических особенностей механизма кризиса теплоотдачи в указанной части области дисперсно-кольцевого режима необходимо

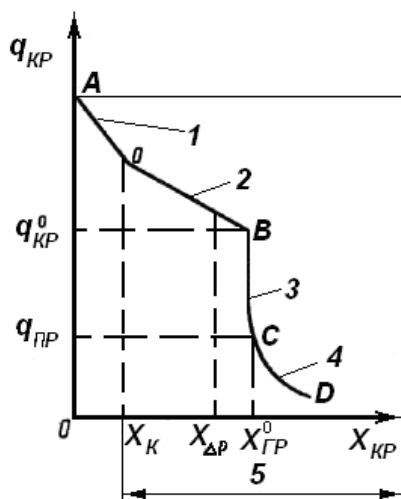


Рис. 2. Качественный характер экспериментальной зависимости  $q_{кр} = f(x_{кр})$  в ПК в соответствии с физической моделью кризиса теплоотдачи 2-го рода [2]: 1 - область кризиса теплоотдачи 1-го рода; 2 - высыхание жидкой пленки с пузырьковым уносом; 3 - высыхание неорошаемой пленки без пузырькового уноса; 4 - высыхание орошаемой пленки; 5 - область дисперсно-кольцевого режима течения.

отметить следующее. В настоящее время вопрос о механизме возникновения и развития кризисных явлений в тонких (толщиной от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров) пристенных жидкостных пленочных структурах в дисперсно-кольцевом режиме течения продолжает оставаться открытым. Показательно, что в отношении указанной области пока нет единой точки зрения на механизм кризиса теплоотдачи в данном диапазоне параметров, поскольку одни исследователи относят его к кризису пузырькового кипения, а другие – к кризису высыхания. Характерно также и то, что указанная неопределенность в решающей мере обусловлена нерешенными до настоящего времени проблемами контроля процесса кипения в тонких жидкостных пленочных структурах. Существующие экспериментальные методы зондирования двухфазных парожидкостных потоков, в особенности при высоких параметрах теплоносителя в ПК, решения этой задачи не обеспечивают.

С учетом известных результатов экспериментальных работ, посвященных исследованию механизма процесса кипения в тонких парожидкостных пленках, есть основания утверждать следующее. Во-первых, фактором, непосредственно обуславливающим кризис теплоотдачи в указанной части области дисперсно-кольцевого режима течения перед возникновением микропленки на стенке ПК нельзя считать только процесс испарения с поверхности волн пристенных пленочных структур различной толщины (от сотен до десятков микрометров), как это было первоначально постулировано в модели [2]. Во-вторых, непосредственной причиной кризиса в указанной области нельзя считать также и пузырьковый унос с поверхности этой пленки между гребнями волн.

Иллюстрации этого уноса и анализ соответствующих эффектов приведены в наших недавних работах [5, 6]. С учетом результатов известных работ применительно к условиям большого объема есть основания полагать, что основной причиной кризиса теплоотдачи в указанном диапазоне паросодержаний потока следует считать переход от режима пузырькового кипения в пристенном слое жидкости к режиму паровых пленок. Механизм последнего отличается в соответствии с характерными особенностями физики генерации паровой фазы в пристенных пленочных структурах дисперсно-кольцевого режима, характеризуемых наличием крупных волн, а также ряби на поверхности раздела фаз.

Оценивая в общем отличительные особенности физики кризисных явлений в пристенной жидкостной пленке дисперсно-кольцевого режима течения в условиях, когда генерация паровой фазы в пристенных пленочных структурах еще не подавлена, необходимо отметить следующее. Основным фактором, определяющим специфику кризисного перехода от пузырькового кипения к его пленочному режиму следует считать механизм пленочного кипения в тонком (от десятков до сотен микрометров) пристеночном слое жидкости. Есть основания полагать, что определяющей особенностью этого режима генерации паровой фазы является кипение с образованием характерных «кратеров», которое было обнаружено в [4] при кипении в тонких пленках в условиях большого объема при атмосферном давлении.

Известной корректировки требуют также и модельные представления [2] относительно характера теплогидравлических процессов в той части области верхней границы дисперсно-кольцевой структуры двухфазного парожидкостного потока, которая соответствует паросодержанию  $x > x_{\Delta P}$  (участок *BC* на рис. 2). Указанная область дисперсно-кольцевой структуры полностью соответствует условиям формирования на стенке ПК жидкостной микропенки толщиной в несколько микрометров [7], в которой процесс генерации паровой фазы уже подавлен. Поэтому «кратерный» механизм кризиса теплоотдачи в этой микропенке становится уже невозможным. В этой связи необходимо отметить, что наряду с исследованиями, проведенными в обоснование и развитие модели [2], за последние десятилетия выполнен также обширный цикл отечественных и зарубежных работ, посвященных изучению гидродинамических, а также тепло- и массообменных процессов, непосредственно обуславливающих переход дисперсно-кольцевого режима течения в дисперсный.

С учетом результатов этих исследований определенной корректировке подлежит также и та часть физической модели [2], которая трактует основные факторы, обуславливающие характер и специфику процесса уменьшения расхода жидкости в пристенной микропенке при переходе дисперсно-кольцевого режима течения в дисперсный. При этом необходимо учесть следующие наиболее важные физические аспекты этого перехода.

В настоящее время можно считать окончательно установленным, что постулированная в [2] форма зависимости  $q_{кр} = f(x_{кр})$  с характерным вертикальным участком *BC* (см. рис. 2) не является универсальной.

Анализ сил, действующих на каплю дисперсной влаги в потоке пара в дисперсно-кольцевом режиме течения показал, что основными факторами, препятствующими осаждению капель жидкости на пристенную жидкостную пленку, являются поток пара, отходящий от стенки, а также сила Магнуса - Жуковского. Их сочетание и предопределяет характер локализации этой влаги в ближней или дальней зоне пристенной области.

Различная интенсивность процессов испарения в пристенной жидкостной микропенке, механического и пузырькового уноса массы с поверхности этой структуры, а также ее орошения каплями дисперсной влаги обуславливается конкретным сочетанием значений режимных параметров процесса теплообмена и геометрических характеристик ПК. Это сочетание и предопределяет конкретный характер предкризисной гидродинамики снижения расхода в пристенной микропенке на границе перехода дисперсно-кольцевого режима течения в дисперсный.

Характер предкризисной динамики микропенки обуславливается, кроме того, особенностями геометрии ПК, которые и предопределяют специфику соответствующего фрагмента экспериментальной зависимости  $q_{кр} = f(x_{кр})$ , а именно с вертикальным (линия *BC* на рис. 2), наклонным или вырожденным (как это следует, например, из данных [8, 9 и др.]) участком этой зависимости.

Граничным паросодержанием  $x_{гр}$  следует считать ту его величину, при которой в соответствующем диапазоне давлений и массовых скоростей потока имеет место: либо отсутствие осаждения капель из ядра потока на пристеночную микропенку, либо взаимная компенсация уноса и выпадения на нее дисперсной влаги (последний из указанных двух частных случаев как раз и соответствует условию  $D = B$  в известном дифференциальном уравнении расхода жидкости в пристенной пленке для аксиальной координаты *Z* ПК с периметром *P* и сечением *A* вида

$$\frac{dG_{нл}}{dZ} = \frac{P}{A}(D - E - B),$$

которое и постулируется в модели [2]).

При выработке эффективных подходов к решению проблемы раннего автоматического обнаружения кризисных явлений в активных зонах ЯР, включая кризис теплоотдачи 2-го рода, определяющее значение имеет проблема выбора информативных диагностических

признаков. На их основе должна быть обеспечена высокая надежность распознавания начальных фаз кризисных явлений в области верхней границы дисперсно-кольцевой структуры двухфазного парожидкостного потока. Следует подчеркнуть, что распознавание кризиса теплоотдачи в области паросодержаний  $x > x_{\Delta P}$  должно быть обеспечено в условиях подавления процесса генерации паровой фазы в пристенной жидкостной микропенке на стенке ПК. С учетом изложенного и на примере типичной диаграммы уноса, представленной на рис. 3, целесообразно проанализировать специфику механизма снижения расхода в пристенной жидкостной микропенке в области паросодержаний  $x > x_{\Delta P}$ .

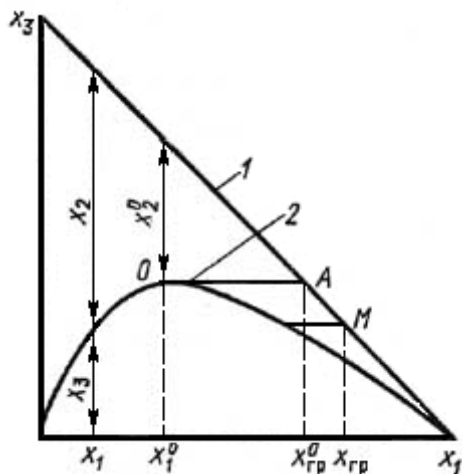


Рис. 3. Оценка информационной значимости диагностических параметров ПК в области верхней границы дисперсно-кольцевого режима течения на основе характеристик диаграммы уноса для целей прогнозирования кризиса теплоотдачи 2-го рода: 1 – линия общего расхода жидкости в ПК; 2 – кривая гидродинамического равновесия.

Вполне очевидно, что в момент возникновения кризиса теплоотдачи 2-го рода расход жидкости в пристенной микропенке равен нулю или близок к нему. При этом с позиций физической модели [2] высыхание пленки завершается при граничном паросодержании  $x_{гр}^0$

в момент, когда отсутствует как орошение пленки каплями влаги, так и пузырьковый унос. При отсутствии орошения расход жидкости в ядре потока может только увеличиваться или, по крайней мере, оставаться постоянным. Увеличение  $x_3$  имеет место только до точки  $O$  из-за динамического уноса влаги из пленки. При более высоком паросодержании потока динамический унос прекращается, поскольку расход жидкости в пленке становится меньше равновесного. Указанное обстоятельство определяет постоянство расхода жидкости в ядре потока в обогреваемом ПК при  $x_1 > x_1^0$ . При этом отсутствуют и динамический унос, и орошение, т.е. влагообмен между ядром и пленкой. Таким образом, граничное паросодержание определяется абсциссой точки пересечения  $A$  горизонтальной касательной к кривой гидродинамического равновесия с линией общего расхода жидкости в потоке.

Экспериментальные исследования, выполненные в адиабатных условиях и с обогревом, показали, что при квазиравновесном процессе испарения пленки (умеренные значения режимных параметров  $p = 3 - 10$  МПа и  $G = 500 - 1500$  кг/(м<sup>2</sup>·с)) до паросодержания, соответствующего максимальному расходу жидкости в ядре потока, показали, что обогрев ПК не оказывает влияния на распределение влаги между ядром потока и пленкой. Это означает, что при  $x_{вх} < x_1^0$  граничное паросодержание  $x_{гр}^0$  не зависит от энтальпии потока на входе. Напротив, при  $x_{вх} > x_1^0$  расход жидкости в пленке оказывается большим при одном и том же паросодержании, чем в случае  $x_{вх} < x_1^0$ , что и приводит к высыханию пленки при более высоком паросодержании  $x_{гр}$  (точка  $M$  на рис. 3).

Таким образом, с позиций оценки информационной значимости тех диагностических параметров, которые характеризуют процесс снижения расхода в пристенной жидкостной микропенке, непосредственно предшествующий возникновению кризиса теплоотдачи 2-го рода, необходимо заключить следующее.

Паросодержание  $x_1^0$ , при котором достигается максимальный расход жидкости в ядре потока, является интегральным диагностическим параметром, который обобщенно характеризует предкризисную динамику ПК в области перехода дисперсно-кольцевого режима течения в дисперсный.

Паросодержание  $x_1^0$  соответствует области кризиса гидравлического сопротивления и является верхней границей образования микропенки на стенке ПК.

Возможность распознавания кризиса гидравлического сопротивления в ПК следует считать одним из определяющих условий возможности прогнозирования кризиса теплоотдачи 2-го рода в области перехода дисперсно-кольцевого режима течения в дисперсный.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров М. В., Боришанский В. М. Существование пузырькового кипения в организованном двухфазном потоке // ТВТ. - 1975. - Т. 13, №5. - С. 1035 - 1039.
2. Дорошук В. Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. - 2-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 120 с.
3. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. - К.: Наук. думка, 1980. - 315 с.
4. Толубинский В. И., Антоненко В. А., Островский Ю. Н. Подавление пузырькового кипения в неподвижной пленке жидкости // ТВТ. - 1977. - Т. 15, № 4. - С. 825 - 827.
5. Шараевский И. Г., Фиалко Н. М., Зимин Л. Б., Меранова Н. О. Проблемы прогнозирования кризиса теплоотдачи в дисперсно-кольцевом режиме течения двухфазного парожидкостного потока // Проблемы безпеки АЕС і Чорнобиля. – 2010. – Вип. 13. – С. 69 – 75.
6. Теплофизика безопасности атомных электростанций: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. – 484 с.
7. Левитан Л. Л., Боровский Л. Я. Голография пароводяных потоков. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 152 с.
8. Кириллов П. Л., Богословская Г. П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 456 с.
9. Pioro, I.L. and Duffey, R. B., Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications, ASME Press, New York, NY, USA, 2007, 334 p.

**І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін, Н. І. Шараєвська**

#### **ФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КРИЗИ ТЕПЛОВІДДАЧІ 2-ГО РОДУ В АКТИВНІЙ ЗОНІ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРУ**

Розглянуто уявлення про фізичний механізм та ознаки настання кризи тепловіддачі 2-го роду при висхідному русі пароводяного потоку в парогенеруючих каналах.

*Ключові слова:* висихання плівки; паровміст; придушення бульбашкового кипіння; віднесення; рівноважна крива; запас до кризи; плівкове кипіння.

**I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, N. I. Sharayevskaya**

#### **PHYSICAL FEATURES CRISIS OF HEAT TRANSFER OF THE 2ND KIND IN THE CORE OF NUCLEAR REACTOR**

Ideas regarding physical mechanism and approach's indication of heat emission's crisis of 2nd type during ascending motion of vapour-water stream in steam-generating channels are reviewed.

*Keywords:* dryout; steam content; suppression of nucleare boiling; entrainment; equilibrium curve; margin; film boiling

Надійшла 27.09.2011  
Received 27.09.2011