

**И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Н. О. Меранова, Н. И. Шараевская**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

## **О МЕХАНИЗМЕ КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ В ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ**

Рассмотрены представления о физическом механизме кризиса теплоотдачи при вынужденном движении двухфазного потока в обогреваемых каналах.

*Ключевые слова:* активная зона ядерного реактора; кипение недогретой жидкости; пузырьковый и снарядный режим; начало закипания; критическая плотность теплового потока; двухфазный поток; структура потока.

Как известно, максимальная тепловая мощность, которая может быть отведена от активных зон (АкЗ) водо-водяных ядерных реакторов (ВВЯР), ограничена, в первую очередь, опасностью возникновения кризиса теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ. Эксперименты по определению основного фактора обеспечения теплогидравлической надежности ВВЯР - критической плотности теплового потока (КТП) в условиях вынужденного восходящего движения теплоносителя в вертикальных парогенерирующих каналах (ПК) АкЗ проводятся в ведущих мировых научных центрах на протяжении последних шести десятилетий и продолжают выполняться (хотя и не так интенсивно) и в настоящее время. На различных этапах наиболее важные из результатов этих экспериментов подвергались критическому анализу и обобщались в ряде работ, например [1 - 4].

Главной задачей исследовательских работ была и продолжает оставаться оценка достижимых значений КТП от поверхности ТВЭЛ к двухфазному парожидкостному потоку. Иначе говоря, речь идет об оценке безопасного верхнего предела форсировки процесса теплообмена в ПК АкЗ. Однако следует отметить, что после проведения широких серий подобных экспериментальных оценок применительно к конструкциям первых образцов ВВЯР, число работ, посвященных исследованию физического механизма кризисных явлений в двухфазных парожидкостных потоках, особенно в области высоких паросодержаний, было небольшим. В силу значительных объективных трудностей, сопровождающих подобные экспериментальные работы, прогресс в понимании физики сложного и многопланового вероятностного теплогидравлического процесса, которым является кризис теплоотдачи в основных режимах течения двухфазного парожидкостного потока, следует признать достаточно скромным.

Механизм кризисных явлений в ПК анализируется нами с целью выбора диагностических параметров для реализации предлагаемого метода раннего автоматического обнаружения и прогнозирования кризисных явлений в ПК ВВЯР во всем диапазоне режимов течения двухфазного парожидкостного потока, включая пузырьковый, снарядный, эмульсионный и дисперсно-кольцевой режимы. В этой связи необходимо обратить внимание на ряд характерных особенностей работ начального периода, типичных в своем интегральном подходе к изучению КТП во всем диапазоне паросодержаний двухфазного парожидкостного потока, практически используемом для целей теплосъема в АкЗ.

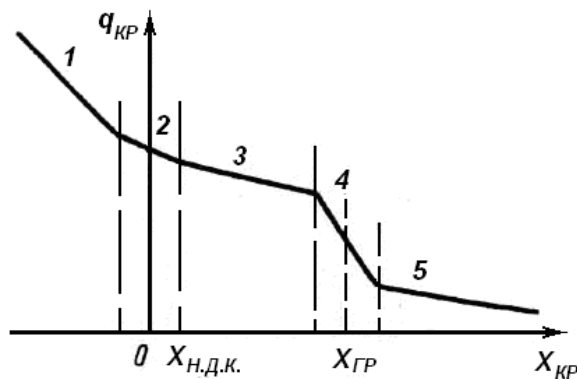
Во-первых, в силу имевших место геометрических ограничений (в большинстве подобных стендовых экспериментов использовались, в основном, относительно короткие ПК) экспериментальные значения КТП, полученные в результате исследования кризисных явлений в кипящих каналах, реально соответствовали области отрицательных значений относительной энтальпии ( $x \leq 0$ ) либо относительно небольшим положительным значениям этого параметра. В результате полученные значения КТП соответствуют условиям вынужденного движения в ПК недогретой воды или пароводяного потока с достаточно низкими значениями паросодержания.

© И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Н. О. Меранова, Н. И. Шараевская, 2012

Во-вторых, основным результатом этих работ явилась экспериментально установленная зависимость зарегистрированных значений КТП от соответствующих предельным тепловым нагрузкам значений относительной энтальпии в их кризисном сечении вида  $q_{кр} = f(x_{кр})$ . Участок этой зависимости, обобщающей эти экспериментальные точки для области  $x \leq 0$ , представляет собой наклонную прямую, плавно переходящую в слабо выраженную вогнутую линию при достижении положительных значений относительной энтальпии ( $x > 0$ ).

В-третьих, визуальными наблюдениями, которые в ряде случаев сопровождали указанные эксперименты, было установлено, что возникновение кризиса теплоотдачи в ПК в области  $x \leq 0$ , а также при относительно небольших положительных значениях этого параметра обусловлено переходом пузырькового кипения к его пленочному режиму. Указанный вид кризиса называют кризисом теплоотдачи 1-го рода. Зарубежными исследователями этот вид кризиса теплоотдачи, в силу характерных особенностей его внешнего проявления, т.е. быстрого и резкого скачка температуры теплоотдающей поверхности, был назван *fast burnout*, т.е. «быстрым кризисом». Однако как оказалось при исследованиях КТП в области высоких паросодержаний потока, соответствующих дисперсно-кольцевому режиму течения, кризис 1-го рода не исчерпывает всего многообразия подобных явлений в ПК.

На рисунке в соответствии с устоявшимися представлениями [1, 4 и др.] о влиянии структурных характеристик двухфазного парожидкостного потока на величину КТП при кипении теплоносителя в условиях его вынужденного движения представлен типичный качественный характер экспериментальной зависимости  $q_{кр} = f(x_{кр})$ , обобщенной для всего практически используемого диапазона значений относительных энтальпий двухфазного парожидкостного потока. Как обычно, эта зависимость представлена для фиксированных значений давления теплоносителя, его массовой скорости, а также для конкретного диаметра цилиндрического ПК. В этой зависимости обычно выделяют пять характерных зон. Важно подчеркнуть, что зона 1 соответствует режиму недогретого пузырькового кипения теплоносителя, когда наступление кризиса теплоотдачи в области  $x < 0$  обусловлено переходом недогретого пузырькового кипения к его пленочной форме на основе механизма структурной динамики сухих пятен в жидкостном макрослое. Таким образом, зона 1 в пределах соответствующего ей участка кривой иллюстрирует область данного физического механизма кризиса теплоотдачи.



Качественный характер обобщенной экспериментальной зависимости  $q_{кр} = f(x_{кр})$  в ПК и взаимосвязь значений КТП в парожидкостном потоке с основными режимами его течения: 1 - недогретое пузырьковое кипение; 2 - снарядный режим течения; 3, 4, 5 - дисперсно-кольцевая структура.

Между зоной 1, соответствующей режиму недогретого пузырькового кипения, и областью дисперсно-кольцевой структурной формы двухфазного парожидкостного потока (с этим режимом течения соотносятся зоны 3 - 5) находится переходная зона 2, в которой локализованы снарядный, а также эмульсионный режимы. Характерно, что зоне 2 соответствует и область инверсии, в которой наблюдается изменение знака зависимости КТП от величины массовой скорости двухфазного потока. Обращает на себя внимание также и тот факт, что в этой же зоне различными авторами отмечается и значительный разброс экспериментальных данных по КТП, который является косвенным свидетельством вероятностного характера кризиса теплоотдачи, проявляющего себя подобным образом при переходе двухфазного потока к его термодинамически равновесному состоянию. Имеется также ряд экспериментальных доказательств факта предкризисной эволюции сухих пятен в пристенном макро-

слое, которые следует считать достаточным подтверждением адекватности модельных представлений [3].

Обоснованность этой физической модели кризиса теплоотдачи подтверждается также хорошим согласованием с полученными в свое время в работе [5] результатами визуализации процесса возникновения и развития кризисных явлений в зоне 2. Согласно данным этой работы характерная структурная динамика сухих пятен в макрослое в предкризисной области реально имеет место не только в условиях пузырькового кипения, но также в снаряжном и эмульсионном режимах течения. Кроме того, согласно данным [5], кризис теплоотдачи в этих режимах течения наступает тогда, когда температурный уровень стенки достигает значения температуры Лейденфроста. Последнее условие, корреспондируясь с модельными представлениями В. П. Скрипова (подробнее см. в недавней монографии [6]), обоснованно рассматривается авторами [5] в качестве необходимой предпосылки для образования стабильных сухих пятен в макрослое. Считая, таким образом, результаты экспериментов [5] еще одним подтверждением справедливости относительно новых модельных представлений [3], необходимо, тем не менее, обратить внимание также и на следующее важное обстоятельство.

Ни в работе [5], ни в последующих немногочисленных экспериментальных исследованиях механизма кризисных явлений в ПК, не был получен ответ на следующий вопрос: имеет ли образование сухих пятен в макрослое для снаряжного и эмульсионного режимов течения универсальный характер или оно характерно лишь для диапазона низких давлений, в котором это физическое явление изучалось детально?

Показательно, что в относительно недавно изданном учебном пособии [4], как и в других аналитических обзорных работах, включая [7], при оценке возможного механизма кризиса теплоотдачи в зонах 1 и 2 (см. рисунок) упоминается, что физические особенности перехода от пузырькового кипения к пленочному в пузырьковом, снаряжном и эмульсионном режимах течения исследованы недостаточно. Иными словами, факт существования сухих пятен в макрослое и его структурная динамика в предкризисной области нуждается в дополнительных экспериментальных доказательствах. В первую очередь, это следует отнести к основным классам структурных форм парожидкостного потока, включая также и дисперсно-кольцевой режим течения в диапазонах паросодержаний, предшествующих возникновению кризиса гидравлического сопротивления. Согласно ряду других известных экспериментальных данных, при достижении диапазона паросодержаний  $x > x_{\Delta P}$ , соответствующего условиям формирования жидкостной пристенной макропленки, кипение в ней подавляется. В особой мере указанное следует отнести к условиям сложной формы теплоотдающей поверхности, т.е. применительно к реальной геометрии стержневых сборок ТВЭЛ. Кроме того, значительный практический интерес представляет диапазон высоких значений режимных параметров процесса, в первую очередь, применительно к значениям давления, характерным для АКЗ современных реакторных установок.

Область дисперсно-кольцевого режима течения (см. рисунок, зоны 3, 4 и 5) начинается при паросодержании  $x_{ндк}$ . Определяющим с точки зрения возникновения и развития кризисных явлений в этих зонах является различие механизмов кризиса теплоотдачи у верхней и нижней границ дисперсно-кольцевой структуры двухфазного парожидкостного потока. Очевидно, что в области верхней границы этого режима ( $x_{ндк}$ ), а также достаточно протяженного интервала паросодержаний, соответствующих значительной части области существования дисперсно-кольцевой структуры (см. рисунок, зона 3) предкризисная эволюция сухих пятен в макрослое должна иметь место. Это предположение тем более обосновывается тем, что в ряде работ факт кипения жидкости в пристенной пленке доказан экспериментально. Следует согласиться с тем, что в условиях существования пристенной жидкостной пленки достаточной толщины препятствия для устойчивой генерации паровой фазы дискретными центрами парообразования отсутствуют. При этом важно подчеркнуть, что такие условия обеспечиваются также и в гидродинамических подрежимах движущейся пленки с сильными возмущениями, а также с рябью на ее поверхности [8].

В контексте вышеизложенного особо должен быть отмечен тот факт, что физический механизм кризисных явлений в ПК в пределах дисперсно-кольцевой структуры потока должен претерпевать существенные изменения. Иными словами, у верхней и нижней границы дисперсно-кольцевого режима течения физика кризисных явлений должна быть принципиально различной, причем механизм кризиса теплоотдачи в этих условиях, естественно, не может быть сведен только к явлению истощения пристенной жидкостной пленки. Вполне очевидно, что эффект снижения расхода в пристенной микропленке проявляет себя только в области верхней границы дисперсно-кольцевой структуры (т.е. в зоне 4, соответствующей паросодержанию  $x_{гр}$  на рисунке). Тем не менее приходится констатировать, что единая точка зрения на вопрос о механизме кризисных явлений применительно к зонам 1 - 3 в настоящее время отсутствует.

Изложенное позволяет сделать следующие выводы.

Известные результаты визуализации процесса генерации паровой фазы в ПК в пузырьковом, снарядном и эмульсионном режимах течения свидетельствуют о предкризисной эволюции сухих пятен в двухфазном пристенном макрослое. Эти экспериментальные данные следует считать подтверждением адекватности модельных представлений [3] о кризисе теплоотдачи 1-го рода применительно к условиям генерации паровой фазы в ПК.

Разработка онлайн-методов раннего обнаружения режима нестабильного пленочного кипения на поверхности ТВЭЛ, очаги которого формируются над сухими пятнами в двухфазном пристенном макрослое, должна создать необходимые предпосылки для надежного прогнозирования кризиса теплоотдачи 1-го рода. Исходной базой для реализации этих методов могут служить данные косвенного контроля стохастических внутренних физических характеристик процесса кипения [1] путем анализа спектральных параметров флуктуационных составляющих ряда сигналов технологических параметров АкЗ (в особенности, давления и нейтронного потока).

Необходимы дополнительные экспериментальные подтверждения факта образования сухих пятен в макрослое для пузырькового, снарядного и эмульсионного режимов. В особой мере это следует отнести к диапазону значений режимных параметров процесса теплообмена (давлений, массовых скоростей потока, недогрева), характерному для реальных условий эксплуатации АкЗ ВВЯР, а также применительно к реальной геометрии стержневых сборок ТВЭЛ.

Физический механизм возникновения и развития кризисных явлений у верхней и нижней границ дисперсно-кольцевого режима течения принципиально различен. Определяющим при этом является факт возможности эволюции сухих пятен в макрослое кипящей пристенной пленки в области верхней границы этой структуры двухфазного потока. В то же время в области формирования пристенной жидкостной микропленки в окрестности верхней границы дисперсно-кольцевой структуры потока возможность для генерации паровой фазы в микропленке отсутствует.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. - К.: Наук. думка, 1980. - 315 с.
2. Делайе Дж., Гюо М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике / Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 424 с.
3. Ягов В. В. Научное наследие Д.А. Лабунцова и современные представления о пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. - 1995. - № 3. - С. 2 - 10.
4. Кириллов П. Л., Богословская Г. П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 456 с.
5. Fiori M. P., Bergles A. E. Model of critical heat flux in subcooled flow boiling.- Proceedings Fourth International Heat Transfer Conference. - Paris, Versailles. - 1970. - Vol. 1. - В.6.7.
6. Теплофизика безопасности атомных электростанций: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шаравский, Н. М. Фиалко и др. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. – 484 с.

7. *Pirotto, 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.
8. *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 атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2010. - Вип. 13. - С. 69 - 75.

**І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, Н. О. Меранова, Н. І. Шараєвська**

**ПРО МЕХАНІЗМ КРИЗИ ТЕПЛОВІДДАЧІ  
У ВОДООХОЛДЖУВАНИХ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРАХ**

Розглянуто уявлення про фізичний механізм кризи тепловіддачі при вимушеному русі двофазного потоку в каналах, що обігріваються.

*Ключові слова:* активна зона ядерного реактору; кипіння недогрітої рідини; пухирковий і снарядний режим; початок закипання; критична щільність теплового потоку; двофазний потік; структура потоку.

**I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, N. O. Meranova, N. I. Sharayevskaya**

**ABOUT MECHANISM OF BURNOUT  
IN WATER-COOLED NUCLEAR REACTORS**

Ideas regarding physical mechanism of heat emission's crisis at the forced motion of diphasic stream in the heated channels are reviewed.

*Keywords:* Core of nuclear reactor; subcooled boiling; bubble and slug flow; onset of nucleate; critical heat flux; two-phase flow; flow pattern.

Поступила в редакцію 27.09.11