

КРИЗИС ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ И НАСЫЩЕННОЙ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЭЛ КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ

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

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Проанализированы подходы к обнаружению кризиса теплоотдачи 1-го рода на поверхности парогенерирующих каналов в реакторах ВВЭР.

Ключевые слова: кризис теплоотдачи 1-го рода, пленочное кипение, парогенерирующие каналы, поверхности ТВЭЛ, автоматическое распознавание, реакторные шумы

Как известно [1, 2], надежность и безопасность ядерных энергоблоков АЭС с водоохлаждаемыми реакторными установками некипящего и кипящего типов в значительной степени определяется характером процесса теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ - наиболее ответственных и теплонапряженных элементов ЯЭУ. Так, например, для некипящих ядерных реакторов типа ВВЭР, охлаждаемых водой под давлением в режиме конвективной теплоотдачи, наибольшую опасность представляет режим пленочного кипения, при котором (в соответствии с впервые предложенной в [3] классификацией и терминологией) возможно возникновение кризиса теплоотдачи 1-го рода. Возникновение такого кризиса приводит к разрушению (пережогу) оболочки ТВЭЛ и выходу высокорadioактивных газообразных продуктов деления в теплоноситель первого контура. Кроме того, согласно [4], переход к режиму пленочного кипения на поверхности ТВЭЛ (включая и начальные фазы этого аварийного теплогидравлического процесса) недопустим ввиду следующих причин:

превышения предельно допустимой температуры оболочки ТВЭЛ;

возникновения в области кризисных явлений колебаний температуры и термоусталостных напряжений в материале оболочки ТВЭЛ;

активизации аномальных водно-химических процессов, обуславливающих интенсификацию коррозионных процессов в материале оболочки ТВЭЛ.

Согласно известным данным [5 и др.], увеличение плотности теплового потока на теплоотдающей поверхности, охлаждаемой кипящей жидкостью, при определенных условиях может приводить к резкому возрастанию температуры этой поверхности, следствием чего обычно является ее пережог и разрушение. В теплофизике это явление называется кризисом теплоотдачи при кипении, а его интегральная характеристика (критическая плотность теплового потока), при которой наблюдается указанный внезапный рост температуры поверхности, обозначается как $q_{кр}$.

Определяющим в физике кризиса кипения является факт радикального изменения механизма теплоотдачи на теплоотдающей поверхности. При реализации процесса фазового перехода в наиболее простых условиях (при пузырьковом кипении жидкости в большом объеме) кризис теплоотдачи обусловлен переходом теплоотдающей поверхности от режима пузырькового кипения к пленочному. Согласно общепринятой терминологии этот переход соответствует кризису теплоотдачи 1-го рода. В практике инженерных расчетов кипящих аппаратов различного назначения величину первой критической плотности теплового потока $q_{кр1}$, при которой начинается переход к кипению в его пленочной форме, используют только в качестве интегральной характеристики верхнего предела форсировки процесса теплоотдачи при пузырьковом кипении.

Физика кризиса теплоотдачи 2-го рода существенно отличается от механизма кризисных явлений 1-го рода и характерна для верхней части области дисперсно-кольцевой структуры потока. В данной статье эти явления, характерные для предаварийных режимов реакторов кипящего типа (РБМК, ВWR), не рассматриваются.

Следует подчеркнуть, что даже при работе активных зон (АкЗ) ВВЭР в номинальном режиме существует потенциальная опасность неконтролируемого перехода режима теплоотдачи от конвективной теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ сначала к пузырьковому, а затем и к пленочному кипению. Такая опасность обуславливает необходимость надежного обнаружения в любой части ядерного реактора начала кипения и принятия мер к его подавлению, несмотря на высокие значения коэффициента теплоотдачи, которыми характеризуется пузырьковое кипение теплоносителя в тепловыделяющих сборках (ТВС). При этом также следует иметь в виду, что оценки, выполненные в работе [6], свидетельствуют о наличии реальных резервов повышения мощности ядерных реакторов типа ВВЭР путем форсирования теплоотдачи с поверхности ТВЭЛ именно за счет перехода к режиму пузырькового кипения, в первую очередь, в центральных ТВС АкЗ.

В связи с изложенным следует считать, что одной из актуальных задач обеспечения эксплуатационной надежности реакторов ВВЭР и безопасного форсирования их тепловой мощности является придание штатным вычислительным комплексам систем внутриреакторного контроля (СВРК) возможности автоматического распознавания аномальных и предаварийных теплогидравлических режимов в АкЗ ядерных реакторов. Иначе говоря, как указано также в работах [7-9], эти технические средства должны обеспечивать реализацию новых - интеллектуальных - диагностических функций. Функциональное ядро интеллектуальных СВРК нового поколения (наряду с реализуемыми ими в настоящее время процедурами детерминированного контроля АкЗ) должны составить алгоритмы раннего автоматического распознавания следующих теплогидравлических процессов в АкЗ реакторов водо-водяного типа:

аномального теплогидравлического режима - процесса вскипания теплоносителя в ТВС в области границы перехода режима конвективной теплоотдачи с поверхности ТВЭЛ к началу генерации паровой фазы на этой поверхности;

нештатного теплогидравлического режима - пузырьковой структурной формы двухфазного парожидкостного потока в парогенерирующем канале;

предаварийного теплогидравлического режима - начальных фаз возникновения неустойчивого пленочного кипения на поверхности ТВЭЛ;

аварийного теплогидравлического режима - устойчивого пленочного кипения (т.е. кризиса теплоотдачи первого рода).

Далее с целью теплофизического обоснования сформулированных проблем, а также задач диагностического обеспечения безопасной эксплуатации АкЗ водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов проанализированы основные физические особенности возникновения и развития кризисных явлений на поверхности ТВЭЛ применительно к условиям эксплуатации ТВС ВВЭР. Этот анализ выполнен с позиций системного подхода к кризису теплоотдачи первого рода, подлежащему раннему автоматическому распознаванию как объект диагностики. Следует подчеркнуть, что согласно ряду известных физических моделей кризиса теплоотдачи 1-го рода, таких, как [10, 11], развитие кризисных явлений на поверхности ТВЭЛ происходит практически мгновенно и сопровождается осушением всей поверхности теплообмена. Из этого следует, что кризис теплоотдачи 1-го рода принципиально не может прогнозироваться. В то же время, согласно физическим моделям [12-14], развитие кризисных явлений начинается еще в верхней части области пузырькового режима кипения.

Так, например, согласно данным, представленным в работе [15] для условий кипения в большом объеме, образование первых очагов неустойчивого пленочного кипения в верхней части области пузырькового режима начинается в условиях, когда локальные сухие пятна занимают не более 1 % площади теплоотдающей поверхности. Кроме того, там же доказано, что кризис теплоотдачи 1-го рода и разрушение поверхности кипения имеют место в условиях, когда площадь сухих пятен не превышает 12 % этой поверхности. По имеющимся у нас данным, в обоих случаях кризисные явления сопровождаются адекватной перестройкой спектральной структуры информационно значимых реакторных шумов (нейтронный и акусти-

ческий шум, флуктуации гидравлического сопротивления парогенерирующего канала). Таким образом, соответствующие предаварийные состояния принципиально могут быть обнаружены разрабатываемой системой раннего распознавания кризисного режима теплосъема.

С учетом изложенного, для определения классов предаварийных теплогидравлических режимов в реакторах водо-водяного типа, которые подлежат автоматической идентификации в реальном масштабе времени (on-line) с помощью разрабатываемой интеллектуальной системы диагностики, необходимо рассмотреть механизм кризисных явлений 1-го рода на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ.

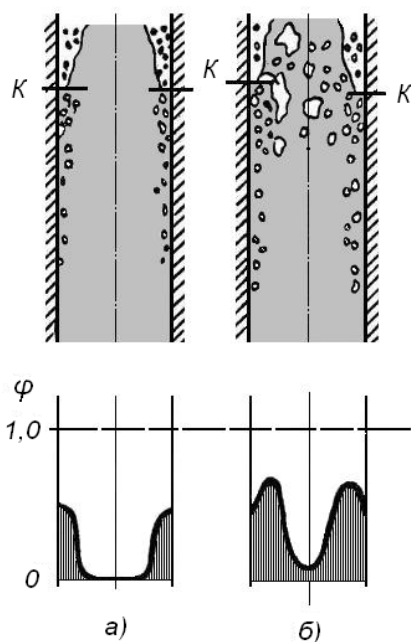
Зависимость плотности теплового потока q , отводимого от теплоотдающей поверхности с температурой T_{cm} , от температурного напора $\Delta T_{cm} = T_{cm} - T_S$ (здесь T_S – температура жидкости в состоянии насыщения) впервые была установлена в 1934 г. [16]. Эксперимент проводился при насыщенном кипении воды на обогреваемой электрическим током платиновой проволоке в условиях большого объема. На результатах именно этой работы и, в первую очередь, на полученной ее автором зависимости $q_{кр} = f(\Delta T)$, которая впоследствии была названа «кривой кипения», базируются широкие исследования кризисов теплоотдачи в различных условиях, которые, в связи с запросами ряда областей новой техники, прежде всего атомной, систематически продолжают в различных странах уже более 70 лет.

Вместе с тем, даже для случая кипения жидкости в наиболее простых условиях (при ее свободном движении в большом объеме) механизм кризиса теплоотдачи до последнего времени был ясен далеко не полностью. Даже теперь налицо не только очевидный дефицит надежной информации о физике кризисных явлений в области тепловых потоков, непосредственно предшествующих $q_{кр}$, но также и существенная противоречивость модельных представлений о механизме кризиса теплоотдачи при кипении. Указанное обстоятельство как в значительной мере сдерживает разработку новых, более совершенных, методик расчета кризиса теплоотдачи, так и существенно затрудняет верификацию известных расчетных зависимостей для его надежного определения. Изложенное в особой мере относится не только к актуальной проблеме создания и верификации расчетных теплогидравлических кодов нового поколения [17, 18] (ставших в настоящее время основным инструментальным средством обоснования безопасности АЭС), но также и к вышеуказанной проблеме интеллектуальной диагностики АкЗ водоохлаждаемых ядерных реакторов. Действительно, известная противоречивость современных модельных представлений о физических процессах, обуславливающих кризис теплоотдачи первого рода, а также непосредственно предшествующих этому верхнему пределу форсировки процесса теплообмена при пузырьковом кипении недогретой и насыщенной жидкости, существенно препятствует также и разработке адекватных математических моделей раннего автоматического распознавания этого аварийного теплогидравлического процесса на поверхности ТВЭЛ.

Отсутствие единства мнений в отношении физики кризисных явлений в парогенерирующих каналах в условиях формирования в двухфазном парожидкостном потоке основных режимов его течения и соответствующих структурных форм потока (пузырьковой, снарядной, эмульсионной, дисперсно-кольцевой), имеет место и для области высоких паросодержаний, для которой характерно возникновение кризиса теплоотдачи второго рода. Это также относится и к теплогидравлическим процессам, непосредственно предшествующим возникновению кризисных явлений в подобных условиях. С учетом изложенного, для разработки методологии создания интеллектуальных диагностических средств раннего автоматического бесконтактного обнаружения кризисов теплоотдачи первого и второго рода на поверхности ТВЭЛ в АкЗ энергетических ядерных реакторов, представляется необходимым конкретизировать основные проблемные аспекты физики кризисов теплоотдачи 1-го рода.

Давно известно [19 - 21], что в случае кипения на обогреваемой поверхности парогенерирующего канала глубоко недогретой жидкости (восходящий поток теплоносителя в таком канале схематично представлен на рисунке, а), интенсивность теплоотдачи от стенки к потоку исключительно высока. Генерируемые на поверхности паровые пузыри растут и

деградируют в перегретом пристенном слое при сохранении недогретым ядра потока. Высокие значения коэффициента теплоотдачи в этом режиме течения обеспечиваются не только за счет испарения жидкостного микрослоя, который формируется в основании парового пузыря и конденсации пара на внутренней поверхности его купола, но также и вследствие интенсивной турбулизации пристенного слоя жидкости. Однако до настоящего времени нет ясности относительно механизма кризисных явлений в области глубоких недогревов. Так, например, в обзорной работе [21], касающейся основных направлений исследований в области кризисов теплоотдачи, отмечается, что в этом режиме течения двухфазного парожидкостного потока причиной кризиса «является либо образование у стенки парового слоя с некоторым критическим объемным паросодержанием, либо рост сухого пятна».



Схематическое изображение основных физических закономерностей механизма кризисных явлений 1-го рода в цилиндрическом парогенерирующем канале при различных режимах восходящего течения двухфазного парожидкостного потока, а также соответствующих профилей истинного паросодержания φ при наступлении кризиса теплоотдачи:

а – недогретое пузырьковое кипение; *б* – насыщенное пузырьковое кипение. *К* – сечение кризиса

Структура ядра двухфазного парожидкостного потока, температура которого близка к температуре насыщения (см. рисунок, *б*), отличается от вышерассмотренного однофазного течения глубоко недогретой жидкости в центральной части канала присутствием в ней оторвавшихся от стенки паровых пузырей. Толщина двухфазного пристенного слоя в условиях формирования такой пузырьковой структуры парожидкостного потока определяется, в основном, глубиной недогрева ядра потока, величиной его массовой скорости, а также характером аксиального распределения плотности теплового потока по длине парогенерирующего канала.

На основании выполненного системного анализа физических моделей кризисных явлений при кипении в двухфазном потоке четыре основные модели, трактующие физические условия возникновения кризиса теплоотдачи с различных, причем существенно отличающихся друг от друга позиций, можно сформулировать следующим образом:

1. Гидродинамическая модель кризиса теплоотдачи, впервые предложенная С. С. Кутателадзе [10] более полувека назад для условий кипения жидкости при ее свободном движении. В основу этой физической модели, получившей широкую известность и дальнейшее развитие в ряде работ, положен эффект вытеснения жидкости из двухфазного пристенного слоя потоком пара, генерируемого на обогреваемой теплоотдающей поверхности. Этот модельный подход не дает возможности объяснить ряд известных экспериментальных фактов. В их числе, например, результаты И. П. Смогалева [22], согласно которым значение $q_{кр}$ при кипении в большом объеме может превышать величину этого параметра в условиях вынужденного движения теплоносителя с малыми скоростями.

2. Тепловая модель кризисных явлений, впервые предложенная Г. Н. Кружилиным [12], а также физически близкие к ней модельные представления В. И. Толубинского [5] и

американских авторов [14]. В основу этой концепции кризиса теплоотдачи положено явление предельного насыщения двухфазного пристенного слоя в предкризисной области центрами парообразования, а также баланс интенсивностей процесса подвода тепла к пристенному паровому пузырю и отвода тепла от него в ядро потока.

3. Термодинамическая модель В. П. Скрипова [11], исходящая из предположения о связи кризиса теплоотдачи с потерей термодинамической устойчивости двухфазного пристенного слоя при достижении превышения величиной критического перегрева жидкости температуры ее метастабильного состояния.

4. Предложенная в [15] модель трансформации структуры двухфазного пристенного слоя в области тепловых потоков, непосредственно предшествующих $q_{кр}$, связывающая развитие кризисных явлений на теплоотдающей поверхности с процессом формирования нестабильных паровых пленок, возникающих над локальными сухими пятнами на теплоотдающей поверхности. Эти модельные представления концептуально близки тепловой модели кризиса теплоотдачи Г. Н. Кружилина [12], корреспондируются с физическими представлениями В. И. Толубинского [5], а также соответствуют общему подходу к оценке этого явления, предложенному в работе [14].

Как показали данные наших исследований [9], режим нестабильного пленочного кипения имеет место не только в условиях большого объема, но также и при вынужденном восходящем движении теплоносителя в парогенерирующем канале. Тем самым подтверждаются модельные представления [5, 12, 14, 15]. С учетом этих физических особенностей кризиса теплоотдачи 1-го рода в рассматриваемых условиях, раннему обнаружению в АКЗ ядерных реакторов на основе информации, содержащейся в реакторных шумах, подлежит режим нестабильного пленочного кипения, предшествующий возникновению кризиса теплоотдачи 1-го рода на поверхности ТВЭЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М.* Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 279 с.
2. *Сидоренко В.А.* Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР. – М.: Атомиздат, 1977. – 324 с.
3. *Дорощук В.Е.* Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 120 с.
4. *Кириллов П.Х.* Опыт эксплуатации реакторов указывает на необходимость новых теплогидравлических исследований // Атомная техника за рубежом. – № 9. – 2003. – С. 3 - 9.
5. *Толубинский В.И.* Теплообмен при кипении. – К.: Наук. думка, 1980. – 315 с.
6. *Зверков В.В., Игнатенко Е.И., Волков А.П.* Резервы повышения мощности действующих АЭС с ВВЭР-440. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 80 с.
7. *Weiss S., Reagan W., Roe I.* Experience with operator aids for nuclear power plants in the USA // Man-Machine Interface in Nuclear Industry. Tokyo, 15 - 19 Febr. 1988. Proc. Int. Conf. Vienna, 1988. – P. 323 - 324.
8. *Fukutomi S., Naito N., Takizawa Y.* An integrated operator decision and system for boiling water reactor power plants // Nucl. Technology. - 1992. – Vol. 99, No. 1. – P. 120 - 131.
9. *Шараевский И.Г., Письменный Е.Н., Домашев Е.Д.* Возможности совершенствования компьютерных систем контроля АЭС на основе методов искусственного интеллекта // Пром. Теплотехника. – 2000. – Т. 22. – № 1. С. 70 - 77.
10. *Кутателадзе С.С.* Гидромеханическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // Журнал технической физики – 1950. – Т. 20, № 11. – С. 1389 - 1392.
11. *Скрипов В.П.* Кризис кипения как термодинамический кризис // Тр. Урал. политехн. ин-та. – 1962, вып. 123. – С. 50 - 57.
12. *Кружилин Г.Н.* Теплоотдача от горизонтальной плиты к кипящей жидкости. // Докл. АН СССР. – 1947. – 58, № 8. – С. 1657 - 1660.
13. *Обобщенная зависимость для критических тепловых потоков при кипении жидкостей в условиях свободного движения / В. И. Толубинский, А. М. Кичигин, С. Г. Повстень // Теплофизика и теплотехника. – 1976. – Вып. 30 – С. 3 - 9.*

14. Розенов У.М. Теплообмен при кипении // Современные проблемы теплообмена. – М. – Л.: Энергия, 1966. – С. 212 - 261.
15. Ягов В.В. Физическая модель и расчетное соотношение для критических тепловых нагрузок при пузырьковом кипении жидкостей в большом объеме // Теплоэнергетика. – 1988. – № 6. – С. 53 - 59.
16. Nukijama S. The maximum and minimum values of the heat transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure // Int. J. Heat and Mass Transf. – 1966. – Vol. 9. – No. 12. – P. 1419 - 1434.
17. Нигматулин Б.И., Мелихов О.И., Соловьев С.Л. Состояние и развитие отечественных системных теплогидравлических кодов для моделирования аварийных и нестационарных процессов на АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. – 2001. – № 3. – С. 17 - 20.
18. Нигматулин Б.И., Василенко В.А., Соловьев С.Л. Разработка расчетных кодов нового поколения – актуальная задача развития отечественной атомной энергетики // Теплоэнергетика. – 2002. – № 11. – С. 2 - 10.
19. Тонг Л. Кризис кипения и критический тепловой поток / Пер. с англ. - М.: Атомиздат, 1976. – 100 с.
20. Моделирование теплогидравлических процессов для обоснования безопасной эксплуатации ЯЭУ // Сб. науч. тр. / Под ред. П. Л. Кириллова. – Обнинск, 1989. – 40 с.
21. Кириллов П.Л. Современные проблемы кризиса теплообмена в каналах // Теплоэнергетика. – 1992. – № 5. – С. 9 - 15.
22. Смогалёв И.П. Расчет критических тепловых потоков при течении недогретой воды с малыми скоростями // Теплоэнергетика. – 1981. – № 4. – С. 14 - 17.

КРИЗА ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ КИПІННІ НЕДОГРЕТОЇ ТА НАСИЧЕНОЇ РІДИНИ НА ПОВЕРХНІ ТВЕЛ ЯК ДІАГНОСТИЧНИЙ ОБ'ЄКТ

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

Проаналізовано підходи до виявлення кризи тепловіддачі 1-го роду на поверхні парогенеруючих каналів у реакторах ВВЕР.

Ключові слова: криза тепловіддачі 1-го роду, плівкове кипіння, парогенеруючі канали, поверхні ТВЕЛ, автоматичне розпізнавання, реакторні шуми

HEAT TRANSFER CRISIS AT BOILING THE UNDERHEATED AND SATED LIQUID ON FUEL ELEMENTS SURFACE AS DIAGNOSTIC OBJECT

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

Approaches to detection of 1 type heat transfer crisis on a steam-generating channel surfaces in VVER reactors are analyzed.

Keywords: crisis of 1 type heat emission, film boiling, steam-generating channel, fuel element surfaces, automatic recognition, reactor noises.

Поступила в редакцію 26.08.08