

ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИЗИСОВ ТЕПЛОТДАЧИ В РЕАКТОРНЫХ КАНАЛАХ

© 2011 г. И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Е. И. Шараевская

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Рассмотрены особенности определения кризиса теплоотдачи при вынужденном движении пароводяного потока в каналах энергетических ядерных реакторов.

Ключевые слова: ядерный реактор, парожидкостный поток, кризис теплоотдачи.

Известно [1 - 4 и др.], что физические особенности возникновения кризиса теплоотдачи при кипении жидкости в большом объеме и при ее вынужденном движении в парогенерирующем канале (ПК) существенно различны. В то время как величина критической плотности теплового потока $q_{кр}$ (КТП) в условиях свободного движения жидкости зависит, главным образом, только от ее недогрева и давления, КТП в ПК обуславливается существенно более сложным комплексом теплофизических и гидродинамических параметров процесса генерации паровой фазы. Под влиянием этих параметров двухфазный парожидкостный поток принимает различные структурные формы, соответствующие основным классам режимов его течения - пузырьковому, снарядному, эмульсионному, дисперсно-кольцевому и дисперсно-му. В числе наиболее важных параметров, влияющих на формирование структурных форм (режимов течения) потока определяющим образом и обуславливающих конкретные физические особенности кризисных явлений в ПК, необходимо перечислить следующие основные теплогидравлические характеристики такой кипящей системы: объемные расходы легкой и тяжелой фаз, давление, плотность теплового потока, величина поверхностного натяжения, плотность и вязкость жидкости и пара, геометрия и характерная длина ПК, его ориентация и направление движения потока, расстояние от входа до рассматриваемого сечения, способы ввода в канал каждой из фаз (они должны быть учтены при составлении карт режимов течения).

Указанный комплекс детерминированных интегральных теплогидравлических параметров двухфазного потока в ПК оказывает определяющее влияние на формирование соответствующих распределений температур, скоростей, давлений, фаз, энтальпий в потоке и тем самым реально обуславливает конкретные физические особенности теплообмена и гидродинамики в каждом из основных классов парожидкостных структур. В то же время каждое из указанных распределений в парожидкостном потоке по причине стохастической природы самого процесса кипения подчиняется вероятностным закономерностям, в силу чего все структурные формы двухфазного потока проявляют себя как случайные объекты. Следует подчеркнуть, что физически нечеткий, вероятностный характер режимов течения кипящего потока, а также границ между режимами может дополнительно усложняться рядом объективных факторов. Во-первых, различные структурные формы потока могут сосуществовать по длине ПК. Во-вторых, в ряде случаев парожидкостные структуры могут быть не полностью развиты, что существенно усложняет даже визуальную классификацию режимов течения и препятствует установлению границ между ними.

Таким образом, из-за вероятностной физической природы самого процесса кипения режимы течения двухфазного парожидкостного потока, а также границы между этими режимами являются физически нечеткими, в силу чего принципиально не могут быть идентифицированы на основе используемых в настоящее время детерминированных подходов [5]. Наряду с этим именно стохастические характеристики процесса кипения (частота генерации паровой фазы, скорость роста паровых пузырей, геометрические параметры паровых ассоциаций) применительно к конкретным теплогидравлическим условиям реально обуславливают

не только характер механизма кризиса теплоотдачи, но также и динамику возникновения и развития кризисных явлений в соответствующем сечении по длине ПК. Показательны в этом отношении данные [2], представленные на рис. 1, которые наглядно иллюстрируют физический механизм кризиса теплоотдачи 2-го рода. В то время, как переход от пузырькового кипения к пленочному, т.е. кризис теплоотдачи 1-го рода, может происходить в условиях глубокого недогрева и низкого паросодержания в центральной части ПК, кризис теплоотдачи 2-го рода (рис. 1) возникает только в дисперсно-кольцевом режиме течения и при высоких паросодержаниях в ядре потока и обусловлен именно испарением жидкостной микропенки, движущейся по стенке канала.

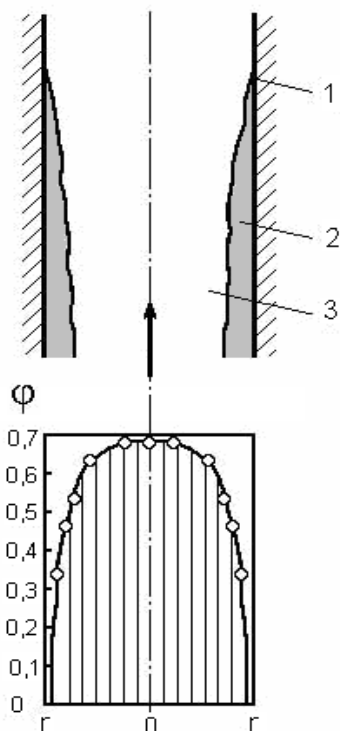


Рис. 1. Физические особенности механизма кризиса теплоотдачи 2-го рода в цилиндрическом ПК в режиме дисперсно-кольцевой структуры парожидкостного потока: 1 - область пересыхания пристенной жидкостной микропенки; 2 - пристенная жидкостная пленка; 3 - паровое ядро потока.

На рис. 2 в качестве иллюстрации структурной динамики основных классов режимов течения в обогреваемом цилиндрическом ПК при увеличении его тепловой мощности представлены результаты визуализации процесса генерации паровой фазы в парожидкостном потоке по данным [6]. Как следует из этих данных, основные классы парожидкостных структур, последовательно меняясь и изменяя области своей локализации по длине ПК при увеличении плотности теплового потока, формируют его следующие (начиная с нижнего входного сечения) теплогидравлические режимы: режим однофазной конвективной теплоотдачи к турбулентному потоку теплоносителя; режим начала генерации паровой фазы на теплоотдающей поверхности (сечения начала кипения при различных плотностях теплового потока на рис. 2 соединены линией А), а также пузырьковый, снарядный, эмульсионный и дисперсно-кольцевой режимы течения с соответствующими областями локализации этих структур. Примечательно, что уменьшение толщины пристенной пленки жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения приводит, как это следует, например, из данных [5 - 7], к подавлению в ней пузырькового кипения (линия В), и в дальнейшем сопровождается высыханием этой пленки, т.е. кризисом теплоотдачи 2-го рода (линия В). Последующий переход к дисперсному режиму течения двухфазного потока условной верхней границей имеет линию Г, которая соответствует началу перехода к конвективной теплоотдаче от стенки канала к однофазному потоку перегретого пара, в котором отсутствуют капли дисперсной влаги.

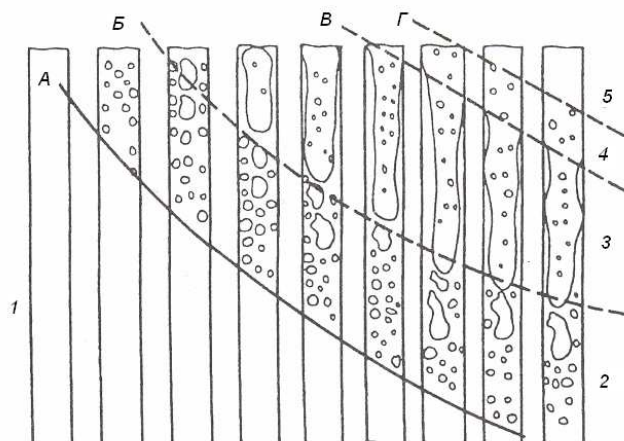


Рис. 2. Динамика формирования основных классов структурных форм парожидкостного потока при увеличении плотности теплового потока (слева направо) в цилиндрическом ПК в условиях $P = \text{const}$, $\rho w = \text{const}$, $i_{\text{ex}} = \text{const}$: 1 - однофазный поток жидкости; 2 - область пузырькового, снарядного и эмульсионного режимов течения; 3 - дисперсно-кольцевая структура двухфазного парожидкостного потока; 4 - дисперсный режим течения; 5 - однофазный поток пара.

Результаты визуализации каждой из вышеуказанных структурных форм парожидкостного потока в цилиндрическом ПК представлены на рис. 3 по результатам восстановления оптических голограмм, которые получены в [5] на основе лазерного зондирования. На рис. 4 по результатам [8] дополнительно представлены характерные особенности основных типов структурных форм двухфазного парожидкостного потока в кольцевом ПК с центральным обогреваемым стержнем.



Рис. 3. Основные режимы течения двухфазного парожидкостного потока в цилиндрическом ПК.

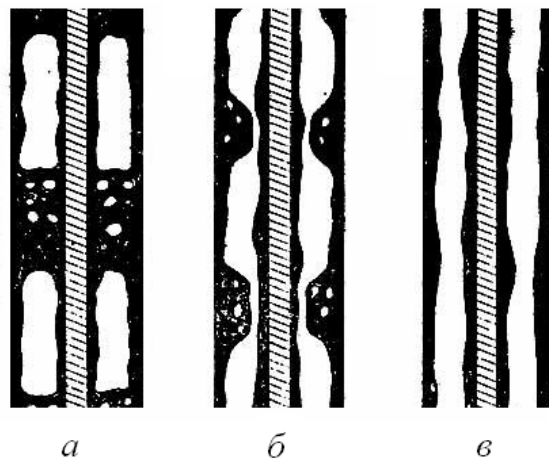


Рис. 4. Характерные особенности некоторых режимов течения двухфазного парожидкостного потока в кольцевом ПК: *а* - снарядный режим; *б* - снарядно-кольцевая структура; *в* - дисперсно-кольцевой режим.

Высокая сложность, вероятностная природа, стохастический характер теплогидравлических процессов, сопровождающих кризисы теплоотдачи 1-го и 2-го рода, а также отсутствие надежных методов идентификации (распознавания) кризисных явлений в ПК серьезно затруднили разработку надежных эмпирических расчетных зависимостей для определения КТП. Указанные объективные факторы обрекли на неудачу

также и все предпринятые ранее попытки автоматического распознавания применительно к реальным условиям эксплуатации активных зон (АКЗ) энергетических ядерных реакторов (ЯР) не только кризисных явлений, но и режимов течения двухфазного парожидкостного потока. В полной мере изложенное следует отнести и к распознаванию режима начала кипения (нижней границы пузырьковой структуры потока).

Свидетельством значительного дефицита надежной информации о физическом механизме возникновения и развития кризисных явлений при кипении теплоносителя в ПК могут служить также следующие факты. Авторы не только современных учебных пособий по теплообмену, но также и известных монографий в области теплофизических и гидродинамических процессов при кипении трактуют механизм кризисных явлений с различных, причем в ряде случаев взаимно исключающих и недостаточно экспериментально обоснованных позиций. Таковы, в частности, модели кризиса теплоотдачи на основе гидродинамического [9 и др.], термодинамического [10] и теплового [11 и др.] модельных подходов. Единственным исключением следует считать экспериментально подтвержденную (главным образом только для условий кипения в большом объеме) модель кризиса 1-го рода [12 и др.], которая основана на анализе структурной динамики роста сухих пятен в макрослое.

Характерно, что, например, в обзоре [13], выполненном с позиций анализа указанной проблемы применительно к американской учебной литературе по теплообмену, обращается внимание на следующее обстоятельство, которое, в целом, характерно также и для современного состояния исследований в области КТП. В этой работе отмечается, что рекомендованные в учебных пособиях расчетные зависимости для определения КТП в большинстве

случаев оценивают этот предел форсирования процесса теплообмена безотносительно к типу сформировавшейся в ПК парожидкостной структуры. Естественно, что авторами этих расчетных соотношений не принимаются во внимание и современные представления о физической природе кризиса теплоотдачи 1-го рода. В [13], в частности, отмечается, что для расчетной практики вплоть до настоящего времени продолжают рекомендоваться не только различные, но также и претендующие на универсальность для любых режимов течения двухфазного потока расчетные зависимости по КТП, многие из которых были разработаны еще в середине минувшего века. С другой стороны, в работе [5] обоснованно отмечается, что попытки найти некую универсальную закономерность возникновения кризиса теплоотдачи и, следовательно, получить единую расчетную зависимость по КТП для различных типов структурных форм двухфазного парожидкостного потока (т.е. для всего практически используемого диапазона паросодержаний потока) следует считать абсолютно бесперспективными. В этом же контексте в ряде относительно недавних обзорных работ, таких, например, как [4], также подчеркивается, что надежных и универсальных обобщающих эмпирических соотношений для расчета КТП в широкой области режимных и геометрических параметров фактически не существует. Аргументированность сформулированной в [4, 14 и др.] точки зрения на принципиальную необоснованность подходов к обобщению экспериментальных данных по КТП при отсутствии информации о реальной структуре двухфазного парожидкостного потока, а также без учета конкретных физических особенностей механизма кризисных явлений в ПК подтверждается очевидными фактами.

Так, в последние десятилетия в ведущих странах мира ведутся интенсивные работы по формированию представительных банков данных по значениям КТП для основных типов ПК (трубы, кольцевые каналы, стержневые сборки ТВЭЛ) [15 - 17] с целью выработки на их основе расчетных рекомендаций для определения $q_{кр}$, а также создания скелетных таблиц [18] для определения этого важнейшего эксплуатационного параметра АкЗ ЯР. Вместе с тем, как подчеркивается в ряде аналитических обзоров [4, 7 и др.], опыт этих работ убедительно показал, что имеют место значительные ограничения на возможность использования для этих целей тех эмпирических расчетных зависимостей и экспериментальных данных по $q_{кр}$, которые были получены различными авторами за весь более чем полувековой период исследований КТП в ПК. Указанные ограничения проявляются в следующем. Во-первых, известные экспериментальные корреляции по КТП, как правило, справедливы только для узкого диапазона режимных и геометрических параметров. Во-вторых, попытки экстраполяции этих расчетных соотношений за пределы диапазона применимости указанных экспериментальных корреляций приводят не только к количественным, но и качественным отличиям от реальных значений КТП.

Вышеприведенное рассмотрение проблем аварийной теплогидравлики АкЗ водоохлаждаемых ЯР, связанных с требованием надежной идентификации кризисных явлений в ПК, позволяет заключить следующее.

Конкретные физические особенности механизма кризиса теплоотдачи в ПК при достижении КТП, а также соответствующая динамика развития в двухфазном парожидкостном потоке предкризисных явлений определяются не только уровнем плотности теплового потока, достигнутым на теплоотдающей поверхности, но также и структурными характеристиками этого потока, т.е. режимом его течения.

Ввиду отсутствия надежных, эффективных и бесконтактных измерительных средств, предназначенных для контроля структурных характеристик парожидкостного потока (обзоры существующих методов контроля режимов течения выполнены, например, в [5, 7]), в подавляющем большинстве экспериментальных исследований КТП контроль режимов течения двухфазного парожидкостного потока, включая предкризисную область, не был обеспечен.

Одной из первопричин существенного расхождения экспериментальных данных различных авторов по КТП в ПК является отсутствие возможностей надежной идентификации таких вероятностных объектов, какими являются кризисы теплоотдачи 1-го и 2-го рода.

Попытки ряда авторов получить универсальную эмпирическую зависимость для расчета КТП на основе экспериментальных данных, относящихся к различным режимам течения и физическим механизмам возникновения кризиса теплоотдачи, не могут быть признаны правомерными.

Вероятностные внутренние физические характеристики процесса кипения (частота генерации паровой фазы, скорость роста паровых пузырей, геометрические параметры паровых ассоциаций) обуславливают конкретные особенности механизма возникновения кризисных явлений в ПК.

Эффективный косвенный контроль внутренних характеристик процесса генерации паровой фазы на поверхности ТВЭЛ в реальных условиях эксплуатации может быть обеспечен на основе использования информации, содержащейся в стохастических флуктуационных составляющих сигналов датчиков давления, нейтронного потока, а также гидравлического сопротивления ПК непосредственно в АкЗ энергетических ЯР.

Получение диагностической информации о характере процесса фазового перехода при кипении на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ непосредственно в ЯР может быть обеспечено на основе разработки методов автоматической идентификации технологических режимов АкЗ [19 - 21 и др.].

Разработка методов автоматического распознавания кризиса теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ в условиях вынужденного движения теплоносителя применительно к основным типам парожидкостных структур обуславливает необходимость анализа механизма кризисных явлений в ПК с целью выбора информативных диагностических признаков, а также разработки эффективных моделей распознавания этих вероятностных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. - К.: Наук. думка, 1980. - 315 с.
2. Тонг Л. Кризис кипения и критический тепловой поток: Пер. с англ. - М.: Атомиздат, 1976. - 100 с.
3. Хьюит Дж. Критическая плотность теплового потока при кипении в условии вынужденного движения // Теплообмен: достижения, проблемы, перспективы: Тр. 6-й Междунар. конф. по теплообмену. - М.: Мир, 1981. - С. 7 - 73.
4. Кириллов П. Л., Богословская Г. П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 456 с.
5. Левитан Л. Л., Боровский Л. Я. Голография пароводяных потоков. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 152 с.
6. Хьюит Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения: Пер. с англ. - М.: Энергия, 1984. - 408 с.
7. Делайе Дж., Гюо М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 424 с.
8. Сато Т., Хаясида И., Мотода Т. Влияние пульсаций расхода на критический тепловой поток // Достижения в области теплообмена: Сб. ст. / Пер. с англ. - М.: Мир, 1970. - С. 231 - 251.
9. Кутателадзе С. С. Гидромеханическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // Журнал технической физики - 1950. - Т.20, № 11. - С. 1389 - 1392.
10. Скрипов В. П. Кризис кипения и термодинамическая устойчивость жидкости // Тепло- и массоперенос. - Минск: Изд-во АН БССР, 1962, т. 2. - С. 60 - 65.
11. Кружжлин Г. Н. Теплоотдача от горизонтальной плиты к кипящей жидкости // Докл. АН СССР. - 1947. - Т. 58, № 8. - С. 1657 - 1660.
12. Лабунцов Д. А. Вопросы теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. - 1972. - № 9. С. 14 - 19.
13. Lienhard J. H. Learning and teaching heat transfer // Heat Transfer Engineering. - 1985. - Vol. 6, No. 3. - P. 26 - 34.
14. Дорошук В. Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. - 2-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 120 с.
15. Бобков В. П. Центр теплофизических данных для ядерных энергетических установок // Атомная энергия. - 1982. - Т. 53, № 3. - С. 183 - 187.

16. Козина Н. В., Блохин В. И., Бобков В. Т. и др. Библиотека данных по теплогидравлическим процессам // Атомная энергия. - 1987. - Т. 63, № 2. - С. 100 - 105.
17. Смолин В. Н., Шпанский С. В., Есиков В. И. и др. Экспериментальные данные и методика расчета при кипении воды, циркулирующей в трубах с равномерным и неравномерным тепловыделением // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. - 1979. - Вып. 5(9). - С. 26 - 35.
18. Методика разработки стандартных справочных данных по критическим тепловым потокам в трубах при равномерном обогреве / П. Л. Кириллов, В. П. Бобков, Э. А. Болтенко и др. // Препринт ФЭИ-2030. - Обнинск, 1989. - 30 с.
19. Скартон Х. А., Макдональд Д. Ф., Кэрри У. М. Обзор акустических методов обнаружения кипения в ядерных реакторах // Аэрогидромеханический шум в технике: Пер. с англ. / Под. ред. Р. Хиклинга. - М.: Мир, 1980. - С. 166 - 198.
20. Ломакин С. С. Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 120 с
21. Мельников В. И., Усынин Г. Б. Акустические методы диагностики двухфазных теплоносителей ЯЭУ. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 160 с.

ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКОВОГО ВИЗНАЧЕННЯ КРИЗ ТЕПЛОВІДДАЧІ У РЕАКТОРНИХ КАНАЛАХ

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

Розглянуто особливості визначення кризи тепловіддачі при вимушеному русі пароводяного потоку в каналах енергетичних ядерних реакторів.

Ключові слова: ядерний реактор, парорідинний потік, криза тепловіддачі.

PROBLEMS OF CALCULATION DETERMINATION OF HEAT TRANSFER'S CRISES IN REACTOR CHANNELS

I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, E. I. Sharaevskaya

The distinctive features of heat transfer's crisis determination at the forced motion of vapour-water stream in channels of nuclear power reactors are reviewed.

Keywords: nuclear reactor, vapor-liquid flow, heat transfer's crisis.

Поступила в редакцію 24.11.10