

ОБ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА В ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ КАНАЛАХ

В.П. Бобков

ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Описаны закономерности для критических тепловых потоков в каналах, охлаждаемых кипящей водой. Ударение сделано на решение задачи влияния различных факторов на кризис в сложных каналах. Использована разработанная полуэмпирическая модель для описания критических тепловых потоков в каналах. Выявленные закономерности позволили получить новые подходы к предсказанию величин критических тепловых потоков в каналах.

В последние годы значительно продвинулись наши представления о кризисе теплообмена в водоохлаждаемых каналах, что привело к существенно более надежному описанию величин критических тепловых потоков (КТП) при кипении в каналах в широком диапазоне параметров и прогнозированию КТП в неисследованных областях параметров. Кризис теплоотдачи при течении кипящей воды в каналах является сложнейшим процессом, обусловленным длинным списком определяющих параметров. Этим определяется возникновение большого количества предложенных многими авторами эмпирических и полуэмпирических подходов, которые позволили дать рекомендации к расчету КТП, но лишь в узких областях параметров. Следует подчеркнуть, что многомерность зависимости КТП от определяющих параметров требует развития самых различных подходов, моделей, теорий. Следует приветствовать как чисто эмпирические подходы, так и методы, основанные на решении системы фундаментальных уравнений, описывающих полное взаимодействие всех фаз. Очевидно, что подходы, основанные на фундаментальных уравнениях [1] были бы наиболее предпочтительными и вызывали бы максимальное доверие. Но пока нет надежды на их скорое осуществление, необходимы и полезны разработки и рекомендации, основанные на полуэмпирических методах. Используются массивы экспериментальных данных, накопленных в различных научных центрах. Наиболее представительным является массив данных по КТП, имеющийся в Центре теплофизических данных Физико-энергетического института [2]. Анализ экспериментальных данных позволил выявить многие закономерности для КТП в каналах и дать достоверные суждения о физических основах этих закономерностей.

Известно, что процессы в трубах исследованы более основательно. Поэтому широко используется относительный (сравнительный по отношению к процессам в трубах) метод исследования. Существует большой опыт использования этого метода по описанию теплогидравлических закономерностей при течении в каналах

сложного профиля поперечного сечения. Имеется в виду метод получения и использования зависимости для труб и поправочных соотношений к ним. Использование такого подхода к описанию КТП в российских публикациях не обнаруживается, кроме [3-5]. В этих работах показано, что применение сравнительного подхода дает хорошие результаты, поправочные функции при этом, как правило, достаточно консервативны.

Концепция элементарной тепловой ячейки (ЭТЯ) была разработана и использована [3-5] для описания КТП в каналах сложного профиля сечения, включая сборки стержней. Она позволила обнаружить и изучить основные закономерности изменения КТП в зависимости от геометрических соотношений каналов некруглого поперечного сечения.

1. Для детального описания КТП в каналах сложного профиля сечения (включая сборки стержней) недостаточно использовать только концепцию поэлементного подхода, когда за основу принимается разбиение канала (например, пучка) на макроячейки (это понятие используется в поэлементном методе, развиваемом в ИАЭ, НИКИЭТе и др.). Метод не отражает детальных закономерностей.

2. Концепция элементарной тепловой ячейки (ЭТЯ) позволяет утверждать, что нет резкого различия в геометрии сечения трубы и других одиночных каналов. Так сечение кольцевых каналов плавно переходит в сечение трубы при $r_1/r_2=0$ или в плоскую щель при $r_1/r_2=1$, или к форме кольцевого канала с эксцентриситетом. Можно также представить себе плавный переход к геометрии сечения ячейки пучка и других каналов. Эти соображения позволили сформировать геометрические и другие критерии, которые определяют относительные зависимости для КТП в каналах и получить универсальные зависимости для КТП в каналах сложного профиля [3-8].

Анализ накопленных данных по КТП в различных каналах, концепция элементарной тепловой ячейки и разработанная на ее основе модель позволили выявить новые закономерности для КТП в различных каналах в широкой области параметров и выработать метод предсказания КТП в неисследованных областях параметров.

Рассмотрим кризис в гладких вертикальных прямых, равномерно обогреваемых круглых трубах, при восходящем течении воды. Кризис в таких трубах наступает при определенном сочетании указанных ниже определяющих параметров. Зависимость можно выразить следующим соотношением:

$$Q_{cr}=Q(P,G,L,X_{in},d_o). \quad (1)$$

Как видно из соотношения (1), имеется очень много определяющих параметров, чтобы описать достоверно зависимость КТП в трубах. Однако обнаружены две закономерности:

- зависимость от диаметра трубы может быть описана посредством поправочного множителя $F(d_o)$;
- для труб одного диаметра влиянием длины можно пренебречь для не слишком коротких каналов, когда мало турбулизирующее влияние условий входа.

В результате можно использовать следующее соотношение для описания КТП в трубах:

$$Q(d_o)=Q(P,G,X_{лок})F(d_o). \quad (2)$$

Согласно (2), вместо пяти параметров имеем уже четыре параметра, а для трубы одного диаметра - всего три определяющих параметра. Обработка по локальным параметрам позволила существенно упростить задачу описания КТП в трубах. Этот факт был воспринят многими исследователями, хотя другие не признают его

до настоящего времени. Во всех зарубежных кодах используются соотношения, основанные именно на этом положении.

Суть соотношения (2) заключается в том, что КТП в каналах определяется локальными параметрами, но для каналов достаточно длинных, в которых можно пренебречь влиянием турбулизации потока на входе. Описанное выше дало возможность, имея большой массив экспериментальных данных, получить надежные методы обобщения и описания КТП в трубах. Большая часть этих аналитических методов предназначена для предсказания КТП лишь в ограниченном диапазоне параметров. Параллельно с аналитическими подходами развивался метод табличного описания КТП в трубах. В работе [9] представлен итог международных усилий по созданию таблиц численного описания КТП в трубах в предельно широком диапазоне параметров.

Обнаружено, что КТП в различных сложных каналах подчиняется некоторой универсальной закономерности, которую следует считать своеобразным «ядром» описания. Это «ядро»- закономерности для КТП в трубах - зависимость КТП от давления, массовой скорости, выходного паросодержания и диаметра трубы (см. (2)). Наилучшим образом это «ядро» представлено в виде таблицы [9]. Поправка на тепловой диаметр для различных каналов (как показано в работах [6-7]) может быть описана соотношением

$$F(d_0)=F(d_{th})=Q(d_{th})/Q(d_{th}=8)=(d_{th}/d_{th}=8)^{(-1/3)}, \quad (3)$$

где d_{th} в мм.

Для концентричных кольцевых каналов (ККК) обнаружена важная закономерность: КТП в ККК очень близок к КТП в трубах (при одинаковых значениях теплового диаметра, массовой скорости и давления) при одном условии:

$$X_{ККК}=X_{тр} + \nabla X,$$

где ∇X - некоторое, иногда существенное, смещение балансного паросодержания, при котором наступает кризис. Можно записать

$$Q_{ККК}=Q_{тр}(P, G, d_{th}, X_0), \quad (4)$$

где $X_0=X+\nabla X$. Это странное смещение, не замеченное ранее, не позволяло прежде получить полноценное описание КТП в кольцевых каналах. В работе [6] дано эмпирическое описание для ∇X и некоторое соображение по возможной причине этого явления. Необходимо подчеркнуть, что данное смещение типично для каналов некруглого поперечного сечения. Для получения относительного описания КТП в сложных каналах необходимо введение поправок не только на величину теплового потока, но и на величину балансного паросодержания.

Эксперименты по исследованию КТП в одиночных каналах сложного сечения показывают, что:

- кризис теплоотдачи наступает в узком месте сечения макроячейки;
- величины КТП зависят от формы сечения, а точнее, определяются, в общем случае, дополнительно тремя параметрами: двумя геометрическими и относительной эффективной теплопроводностью твэла или его модели.

Геометрические факторы следующие: относительная неравномерность охлаждающего слоя ЭТЯ вдоль периметра теплообмена, характеризуемая отношением минимального зазора к среднему; протяженность охлаждающего слоя вдоль периметра сечения. Все факторы определяют КТП в совокупности, т.к. это влияние происходит из-за возникновения тепловой разверки внутри ячейки [6]. Рассмотрим влияние этих факторов подробнее.

Влияние неравномерности зазора Y_0 . Чем сильнее этот параметр отличается от 1 в сторону уменьшения, тем ниже величина критического теплового потока.

Это объясняется тем, что образуется ухудшенная ситуация в узкой части сечения: меньшие локальные величины G и большие локальные величины X . Опыты показывают, что это происходит при относительно малых величинах параметра неравномерности Y_0 .

Влияние удлиненности сечения охлаждающего слоя L_0 . Это влияние объясняется тем, что с увеличением отношения периметра к толщине теплового пограничного слоя растет перегрев в узкой зоне сечения ЭТА.

Влияние эффективной теплопроводности твэла на величину КТП в каналах с неравномерным зазором легко поддается пониманию на фоне действия двух предыдущих параметров: чем меньше теплопроводность твэла (или его модели), тем меньше перетечки тепла из узкой зоны, тем больше перегрев теплоносителя в узкой зоне, тем ниже величина КТП.

Низкие значения КТП имеют место при неблагоприятном сочетании указанных параметров: малая теплопроводность твэла, большая неравномерность охлаждающего слоя, большая относительная протяженность сечения ячейки. В работах [5-8] получены количественные соотношения для указанных зависимостей, позволивших описать КТП в эксцентричных кольцевых каналах, в которых имело место соответствующее сочетание параметров. Здесь они не приводятся.

О турбулизирующем влиянии входных устройств. До настоящего места мы условились считать, что входные условия не сказываются на величине КТП. Это не соответствует действительности для коротких каналов с относительной длиной l_{th}/d_{th} менее 100. Это число условно, т.к. с ростом расстояния от входа это влияние спадает по экспоненте. Кроме того, следует предположить, что в различных экспериментах различны и входные устройства. Эту разницу в настоящее время учесть невозможно. Можно лишь пойти на некоторое усреднение внутри данного типа каналов. Для различных каналов полученные количественные соотношения различны:

$$\text{— для труб } F(l_{th}) = \exp[(d_{th}/l_{th}) \exp(2 \alpha_h)] \quad [3], \quad (5)$$

$$\text{— для кольцевых каналов } F(l_{th}) = 1 + 0.4 \exp(-0.02 l_{th}/d_{th}) \quad [13], \quad (6)$$

$$\text{— для пучков } F(l_{th}) = 0.95 + 0.6 \exp(-0.01 \cdot l_{th}/d_{th}) \quad [12] \quad (7)$$

“Эффект пучка”. До сих пор имело место обсуждение различных закономерностей в трубах и других одиночных каналах. Следует предположить, что в ячейках пучков стержней, если бы они были одиночными каналами, эти закономерности должны сохраняться. Но анализ данных по КТП в пучках, как параллельных каналах, показал, что имеется необходимость учитывать некий “эффект пучка” [7,8,10]. Суть его в следующем: в отличие от одиночных каналов описание КТП в пучках нуждается в дополнительной поправочной функции, учитывающей дополнительное изменение основных режимных параметров $F(P, G, X)$. Свойства этой функции следующие:

- изменение величины функции от параметров весьма существенно, чтобы ею пренебрегать (изменяется от 0.2 до 1.2);

- функция допускает весьма простое ее описание в виде полиномов [8,10], которые, в свою очередь, позволяют осуществить их интерполяцию и экстраполяцию на практически необходимые области параметров.

Приведем здесь эти полиномы

$$F(p, g, X) = (a + b \cdot p + c \cdot p^2 + d \cdot p^3) \cdot F(X), \quad (8)$$

где

$$a = 0.361 + 0.137 \cdot g - 0.01 \cdot g^2;$$

$$b = -1.59 - 0.5849 \cdot g + 0.26 \cdot g^2;$$

$$c = 4.85 + 5.004 \cdot g - 1.367 \cdot g^2;$$

$$d = -2.46 - 5.32 \cdot g + 1.24 \cdot g^2;$$

$$F(X) = 0.7 \text{ для } X < 0 \text{ и } F(X) = 0.7 + 0.5X \text{ для } X \geq 0. \quad (9)$$

При $p < 0,1$ $F(p, g, X) = F(p = 0.1, g, X)$, где $p = P/P_{кр}$, $g = G/1000$.

Таким образом, КТП в сборке стержней можно выразить соотношением:

$$КТП_{пучка}(P, G, d, X) = КТП_{трубы}(P, G, X_0) F(p, g, X) \cdot (d_{th}) \cdot F(l_h). \quad (10)$$

Соотношения для “эффекта пучка” в сочетании с данными для труб и другими поправочными функциями позволили описать эксперименты по КТП для гладких, правильных треугольных пучков. Точность описания вполне приемлема [12].

О таблицах численных значений для КТП в каналах. Описав эмпирическими соотношениями многие основные закономерности для КТП в каналах и пучках стержней в широком диапазоне параметров, грешно было бы не воспользоваться появившимися возможностями для создания таблиц табулированных значений КТП [11, 12]. Такие таблицы были составлены для кольцевых каналов, треугольных, четырехугольных и смешанных пучков. Таблицы имеются в Физико-энергетическом институте. Табличная форма описания КТП позволяет избавиться от основных недостатков аналитического описания КТП: узость параметров, сложность перехода от одних расчетных соотношений к другим, необходимость порой вычислять теплофизические и термодинамические свойства теплоносителя и других. Преимущества табличной методики состоят в следующем: предельно широкие области параметров, плавность изменения величины критического теплового потока по параметрам, наглядность, высокие надежность и точность, удобство использования в расчетах.

Закключение. Выявленные и показанные эмпирические зависимости для КТП в прямых гладких вертикальных каналах позволяют более детально представить круг определяющих параметров, поведение КТП в зависимости от этих параметров, построить таблицы численных значений КТП и предложить методы расчета КТП в таких каналах. Закономерности полезны и для проверки разрабатываемых физических моделей кризиса.

Список литературы

1. Зейгарник Ю.А. Об универсальной модели кризиса кипения недогретой жидкости в каналах // Теплофизика высоких температур. - 1996. - Т.34. - №1. - С.52-56.
2. Ефанов А.Д., Кириллов П.Л., Смогалева И.П., Бобков В.П., Анисимов В.А., Ивашкевич А.А. Тепло-гидравлическая база знаний для решения задач анализа и управления тяжелыми авариями: Сб. трудов конференции “Теплофизика-98”.
3. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Зятнина О.А., Козина Н.В. Обобщение данных по критическим тепловым потокам в каналах: Сб. трудов Международной конференции по безопасности ВВЭР. - Обнинск, 1995. - Т.1. - С.143-154.
4. Бобков В.П. Кризис кипения в каналах различного сечения. Модель описания: Препринт ФЭИ - 2313. - Обнинск, 1993.
5. Бобков В.П., Зятнина О.А., Козина Н.В., Судницын О.А. Кризис кипения в каналах различного поперечного сечения (Модель и результаты статистического анализа): Препринт ФЭИ - 2314. - Обнинск, 1993.
6. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Зятнина О.А., Козина Н.В. Метод оценки кризиса в каналах сложного профиля сечения // Теплоэнергетика. - 1995. - №3. - С. 37-46.
7. Бобков В.П. Особенности кризиса теплообмена в пучках стержней и других сложных каналах // Труды I-ой Российской национальной конференции по теплообмену. - Москва, 1994. - Т.4. - С. 32-37.
8. Bobkov V.P., Kozina N.V., Vinogradov V.N., Zyatnina O.A. New Model for Burnout Prediction in Channels of various Cross Section / Thesis of Report to NURETH-7, 1995. - P. 2539-2552.

9. *Groeneveld D. C., Leung L. K. H., Kirillov P. L., Bobkov V. P. et al* The 1996 look-up table for critical heat flux in tubes // Nuclear Engineering and Design 163 (1996) 1-23.
10. *Бобков В.П., Виноградов В.Н., Зяткина О.А., Козина Н.В.* Относительное описание кризиса кипения в пучках стержней и других сложных каналах // Теплоэнергетика. - 1997. - №5. - С. 2-7.
11. *Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л., Смогалева И.П.* Скелетные таблицы по критическим тепловым потокам в треугольных пучках стержней / Труды конференции NURETH-7, 1997.
12. *Groeneveld D. C., Joaber K., Doefler S., Wong W., Leung L. K. H., Cheng S. C.* The Effect of Fuel Subchannel Geometry on CHF / Thesis of Report to NURETH-5, 1992.
13. *Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л., Смогалева И.П.* Численное описание критического теплового потока в треугольных пучках стержней (Скелетные таблицы, версия 1997 г.) // Теплоэнергетика. - 1999 (в печати).
14. *Бобков В.П., Судницын О.А., Судницына М.О.* Численное и аналитическое описание теплового потока в кольцевых каналах // Атомная энергия. - 1998. - №3. - С. 45-50.

Поступила в редакцию 28.09.99.

and Superphenix design concept fuelled with UN-PuN. These results can be useful for the design of new generation of nuclear reactors.

УДК 621.039.514.4

Tests of Digital Reactimeter with 15 Groups of Delayed Neutrons in Experiments on ZPR \ Yu.V. Volkov, T.G. Petrosov, D.A. Klinov, V.F. Ukraintsev, Ya.V. Slemenitchs, M.Moniri; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 10 pages, 5 illustrations, 5 tables. – References, 2 titles.

The mathematical model of the reactimeter for low power heavy water reactor with using of 15 groups of delayed neutrons is described. Realization of this model on the personal computer in the on-line option is also described. Results of the reactimeter testing and improving its operating regimes by using a signals filter and different delayed neutron data sets are presented.

УДК 536.248: 532.5: 621.039.52

Hydrodynamics and Heat Generation in a Liquid Vertical Eutectic Jet as a Target for the Intense Neutron Source \ E.F.Avdeev, S.L.Dorokhovitch; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 8 titles.

As the target of high-power spallation neutron source the vertical jet of melted lead-bismuth eutectics directed towards to the beam of protons is considered. Locking up vacuum chamber of the accelerator is offered to be realized using the supersonic jet of an inert gas. The computational estimations of gas leakage to the vacuum chamber are given. The analytical solution of a magnetohydrodynamic task and the determination of jet borders using approximation of flow is given. The thermal power of the target, distribution of temperature along the height of the jet and the neutron yield for choosed parameters of protons beam are calculated.

УДК 536.242

On the Basic Regularities of Crisis of Heat Exchange in Water Cooled Channels \ V.P. Bobkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 6 pages. – References, 14 titles.

The regularities for critical heat flows in channels cooled with boiling water are discribed. Accent is put on the solution of a problem of influence of various factors on crisis in complex channels. The developed semiempirical model for treating critical heat flows in channels is used. The detected obtained have allowed to receive new approaches to prediction of critical heat fluxes in channels.

УДК: 621. 039. 534.63

Some results of Experimental Studies of Evaporation-cooled Reactor Fuel Rod Operation Modes in Single-rod Three-circuit Model \ V.N. Bogomolov, V.N. Lopatinsky, V.N. Zamiussky, V.M. Ryaby; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 6 pages, 3 illustrations. – References, 6 titles.

Some results of experimental studies on fuel rod heat removal obtained on physical three-circuit single-rod model which simulated evaporation-cooled reactor cooling system with sodium as a coolant are presented in this work. They give new insight into the problems of designing of sodium reactor installations with evaporation cooling.

УДК 546.718:621.039.7:539.174

Ruthenium as a 99Tc Transmutation Product: Necessary Separation Factor for Use \ A.A. Kozar, V.F. Peretroukhin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 10 pages, 3 illustrations. – References, 26 titles.

The process of preparation of stable ruthenium as platinum group metal by 99Tc transmutation is considered. On the basis of the analysis of parasitic capture of neutrons in targets it is shown