

УДК 621.39

Кризис теплоотдачи и распределение жидкости в пучках стержней в области дисперсно-кольцевого режима течения

Э.А. Болтенко, М.В. Давыдов

АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций»,
г. Электрогорск, Московская обл., 142530, Россия
e-mail: boltenko@erec.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-4-146-154

Поступила в редакцию 27.03.2020

После доработки 16.04.2020

Принята к публикации 17.04.2020

Представлены результаты выполненных ранее исследований по расходам жидкости в пристенной пленке в условиях равновесного распределения фаз. Построена диаграмма массопереноса для необогреваемых каналов. Приведено описание диаграммы массопереноса для обогреваемых каналов. Описан метод определения количества жидкости в пристенной пленке двухфазного дисперсно-кольцевого потока на теплоотдающей поверхности для труб. Метод базируется на установленной экспериментально однозначной связи интенсивности суммарного массообмена между ядром потока и пристенной пленкой и значениями критических тепловых потоков в области дисперсно-кольцевого режима, расходов жидкости в ядре потока и пленке с граничными условиями в начале формирования дисперсно-кольцевого режима и параметрами в месте возникновения кризиса теплоотдачи. Представлены зависимости для определения доли жидкости в пристенной пленке для труб в области дисперсно-кольцевого режима. Построена диаграмма массопереноса во всей области существования дисперсно-кольцевого режима для обогреваемых каналов. Описан подход, на основе которого возможна разработка методики расчета кризиса теплоотдачи в сборках. Выполнены расчеты расходов жидкости в пленках на поверхностях твэл в характерных ячейках 7-стержневой сборки. Ячейки заменялись эквивалентными трубами. Массовые паросодержания x заданы на основе экспериментальных значений, полученных методом изокинетического отбора. Сравнение расчетных расходов жидкости в ядре и полных расходов жидкости в ячейках (измеренных методом изокинетического отбора) вблизи линии полного расхода показывает, что расчетные и экспериментальные значения достаточно близки. Совпадение расчетных и экспериментальных значений паросодержаний x_n на выходе пучка удовлетворительное.

Ключевые слова: диаграмма массопереноса, дисперсно-кольцевой режим, ядро потока, критический тепловой поток, кризис теплоотдачи, расходы в пленке, 7-стержневая сборка, метод изокинетического отбора.

Введение

Одним из основных явлений, ограничивающих мощность реакторной установки, является кризис теплоотдачи, характеризующийся изменением механизма отвода тепла, снижением коэффициентов теплоотдачи и значительным повышением температуры поверхности твэлов.

Надежный теплосъем и безаварийная работа реакторной установки во многом определяются знанием этого явления.

Основным критерием, характеризующим работу различных теплопередающих устройств, является недопустимость возникновения кризиса и сохранение температуры теплоотдающей

поверхности на достаточно низком уровне. В связи с этим максимальная мощность (энергонапряженность), которая может быть отведена от теплопередающих устройств, например тепловыделяющих сборок реакторных установок, ограничена условиями возникновения кризиса теплообмена.

В широкой области режимных параметров кризис теплоотдачи возникает в области дисперсно-кольцевого режима течения двухфазной смеси. Этот режим характеризуется совместным течением жидкости в виде пристенной пленки, движущейся по стенке канала и пара с диспергированными в нем каплями жидкости в ядре потока. Между пристенной пленкой и центральным паровым ядром происходит непрерывный обмен массой, теплом и количеством движения. Возникновение и развитие кризиса теплоотдачи в условиях дисперсно-кольцевого режима течения определяется рядом основных массообменных процессов, приводящих к исчезновению пристенной пленки, текущей по обогреваемой поверхности. Известно, что в области дисперсно-кольцевого режима течения кризис теплоотдачи обусловлен истощением пристенной пленки. Определив расход жидкости в пленке, можно определить условия наступления кризиса теплоотдачи. Расход жидкости в пристенной пленке может быть определен на основе уравнения баланса жидкости в пленке. Для решения уравнения необходимы данные по локальному уносу и орошению, границам давления и начала кипения в пленке и др. Данные такого рода для обогреваемых каналов немногочисленны [1]. Известные данные по распределению жидкости в трубах при параметрах, характерных для АЭС, получены в 80-х гг. прошлого столетия [1, 2]. Основной массив доступных опытных данных по распределению жидкости при параметрах, характерных для АЭС, относится к низким приведенным давлениям для водовоздушных потоков [3, 4]. Часть данных обобщена в диссертации Минко М.В. [5].

Известные модели кризиса теплоотдачи отличаются друг от друга учетом различных массообменных процессов, ответственных за возникновение кризиса теплоотдачи [1]. Обменные процессы, которые рассматриваются в моделях, включают процессы уноса, орошения и испарения пленки. Кризис отождествляется с полным истощением пленки. Как правило, модели яв-

ляются незамкнутыми из-за недостаточной полноты охвата процессов.

Успешное применение этих моделей зависит от качества замыкающих расчетных соотношений для расчета распределения жидкой фазы. Эмпирические замыкающие соотношения базируются, как правило, на экспериментальных данных, полученных на водо-воздушных смесях и пароводяных потоках низкого давления. В области режимных параметров, характерных для энергетических установок, экспериментальные данные о массообменных процессах ограничены. В связи с этим успешное применение известных расчетных моделей затруднено.

Введение понятия интенсивности суммарного массообмена между ядром потока и пристенной пленкой (без рассмотрения отдельных составляющих массообмена) позволяет упростить уравнение баланса жидкости в пристенной пленке и решить ряд задач. Ниже представлено описание подхода для определения кризиса теплоотдачи в пучках стержней, основанного на использовании понятия интенсивности суммарного массообмена.

Распределение жидкости между ядром потока и пристенной пленкой. Диаграмма массопереноса для необогреваемых каналов

Гидродинамически равновесные распределения фаз являются предельными потенциально достижимыми состояниями, к которым стремится дисперсно-кольцевой поток. Данные по распределению жидкости, полученные при гидродинамически равновесном течении, составляют полезную основу для сравнения с распределениями фаз в неравновесных условиях. Гидродинамически равновесное распределение во многих случаях (даже при тепловых потоках, существенно отличных от нуля) позволяет определить направление, а частично, и интенсивность процессов массообмена между ядром потока и пленкой в адиабатных системах (тепловой поток на стенке равен нулю, $q = 0$). При достаточно большой длине канала в случае адиабатных условий массовые потоки уноса жидкости из пленки и орошения ее каплями из ядра потока асимптотически достигают своих предельных значений. Такую ситуацию принято называть «гидродинамическим равновесием». Понятие «гидродинамического равнове-

сия» в некоторой степени условно, практические длины каналов всегда ограничены, кроме того распределение фаз изменяется по длине за счет падения давления. На практике под гидродинамическим равновесием принято понимать такое состояние системы, когда увеличение длины канала не сказывается на результатах, например, измерения расхода жидкости в пленке. При этом давление в системе и другие параметры относят к сечению измерения. Поскольку гидродинамически равновесное состояние двухфазной смеси является потенциально достижимым при данных режимных параметрах, то экспериментальные результаты по распределению жидкости между ядром потока и пристенной пленкой жидкости при гидродинамическом равновесии, полученные при течении различных жидкостей, составляют полезную основу для сравнения с распределением фаз, полученных в неравновесных условиях.

Известен ряд зависимостей, на основе которых возможно определить расход жидкости в пристенной пленке в условиях гидродинамически равновесного течения двухфазной смеси. В результате обработки данных на воде и фреоне-12 [6, 7] получена следующая зависимость

$$\psi = 0.874 \cdot \left(\frac{We}{1000}\right)^{-0.733} \left(\frac{\mu'}{\mu''}\right)^{-0.545} \times \left(\frac{\sigma \rho' d \cdot 10^{-7}}{\mu'^2}\right)^{0.239}, \quad (1)$$

где ψ – доля жидкости в пристенной пленке; $We = w'' d \rho'' / \sigma$ – число Вебера; μ' , μ'' – дина-

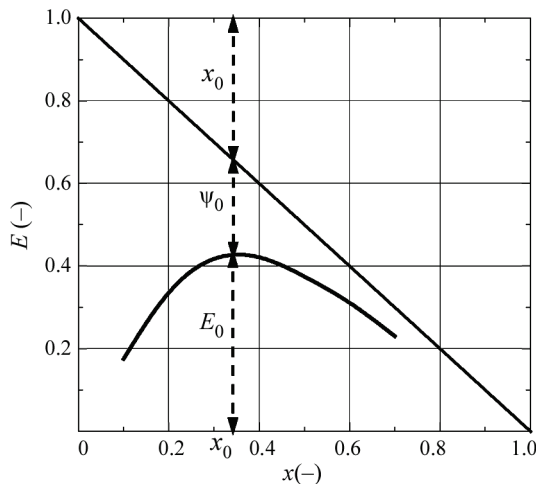


Рис. 1. Распределение жидкости в ядре потока в условиях гидродинамического равновесия: вода, труба, $p = 7$ МПа, $\rho_w = 1000$ кг/(м³с), $d = 8$ мм

мическая вязкость воды и пара; ρ' , ρ'' – плотность воды и пара; d – гидравлический диаметр; σ – коэффициент поверхностного натяжения воды.

Зависимость (1) применима для течений воды с параметрами $p = 0.49$ – 9.8 МПа, $\rho_w = 500$ – 4000 кг/(м³с) и фреона-12 с параметрами $p = 1.06$ – 2.26 МПа, $\rho_w = 240$ – 2000 кг/(м³с) в каналах диаметром $d = 8$ – 14 мм.

В результате обработки данных на воде в работе [8] получены следующие зависимости:

$$\psi = 0.26 \cdot (We/1000)^{0.38} (\mu'/\mu'')^{-0.34} \times (\rho'/\rho'')^{0.26} \quad \text{при } We \leq 1.1; \quad (2)$$

$$\psi = 0.27 \cdot (We/1000)^{0.78} \cdot (\mu'/\mu'')^{-0.064} \times (\rho'/\rho'')^{0.063} \quad \text{при } We > 1.1. \quad (3)$$

Зависимости (1)–(3) позволяют определить расход жидкости в пристенной пленке в условиях гидродинамически равновесного течения двухфазной смеси воды и хладона. На рис. 1 показана диаграмма массопереноса, построенная на основе зависимостей (1)–(3), на которой $E = 1 - x - \psi$ – это доля жидкости в ядре потока, x – массовое паросодержание смеси, ψ – доля жидкости в пристенной пленке. Наличие максимума при некотором паросодержании x_0 объясняется действием двух противоположных процессов: динамического уноса влаги с поверхности пленки и осаждением капель на пристенную пленку. До точки x_0 распределение жидкости в дисперсно-кольцевом потоке контролируется в основном процессом динамического уноса, после точки x_0 – орошением.

Распределение жидкости между ядром потока и пристенной пленкой в трубах при обогреве стенки

На основе экспериментальных данных по расходам жидкости в пленке (фреон-12) [9] показано, что в области дисперсно-кольцевого режима возникновение кризиса теплоотдачи непосредственно имеют место зоны как переобладающего уноса жидкости из пристенной пленки, так и орошения. Между этими зонами размещается переходная зона. В этой области происходит затухание уноса и усиление процессов выпадения капель из ядра потока на пленку. При некотором сочетании режимных параметров и плотности теплового потока

интенсивность результирующего массообмена равна нулю. В зависимости от режимных параметров ширина переходной зоны различна. В этой зоне данные по кризису характеризуются наибольшим разбросом, в этой зоне описание данных сводится к линейной интерполяции между границами. На основе анализа данных по распределению жидкости между ядром потока и пристенной пленкой и кризиса теплоотдачи установлено [9, 10]:

1. Кризис теплоотдачи в области дисперсно-кольцевого режима обусловлен истощением пленки жидкости, текущей по обогреваемой поверхности.

2. В начале дисперсно-кольцевого режима течения расходы жидкости в ядре потока при различных тепловых потоках практически совпадают.

3. В зависимости от плотности теплового потока и режимных параметров преобладающими процессами массообмена между ядром потока и пристенной пленкой могут быть как процессы уноса, так и орошения. Между областями с преобладающим уносом жидкости из пленки или орошением пленки каплями, выпадающими из ядра потока, находится область перехода, в которой унос сменяется процессом орошения. В зависимости от режимных параметров ширина области перехода (по x) различна.

4. В области перехода при некоторых q и x суммарный массообмен между ядром потока и пристенной пленкой практически равен нулю ($dE/dx = 0$). В этом случае истощение пленки обусловлено только ее испарением. Паросодержание, при котором $dE/dx = 0$, соответствует, по терминологии Дорощука В.Е. [11], граничному паросодержанию $x_{кр} = x_{гр}$. При этом граничному паросодержанию (в отличие от трактовки Дорощука В.Е.) соответствует единственное значение теплового потока.

На основе этих положений построена качественная диаграмма массопереноса и соответствующая ей зависимость критического теплового потока от массового паросодержания (рис. 2). Предложен метод [12] определения ко-

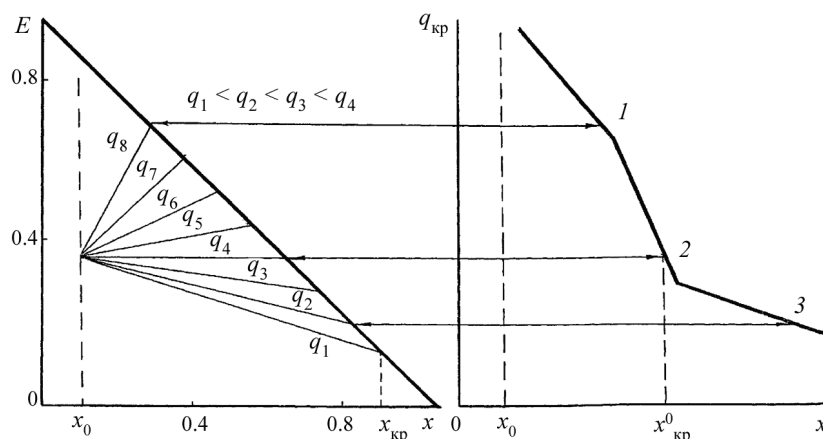


Рис. 2. Качественный вид диаграммы массопереноса и соответствующей зависимости критического теплового потока от массового паросодержания: 1 – область преобладающего уноса жидкости из пленки; 2 – переходная область; 3 – область преобладающего орошения

личества жидкости в пристенной пленке двухфазного дисперсно-кольцевого потока на теплоотдающей поверхности. Метод базируется на установленной экспериментально однозначной связи интенсивности суммарного массообмена между ядром потока и пристенной пленкой и значениями критических тепловых потоков в области дисперсно-кольцевого режима, расходов жидкости в ядре потока и пленке с граничными условиями в начале формирования дисперсно-кольцевого режима и параметрами в месте возникновения кризиса теплоотдачи.

Получена следующая зависимость для определения доли жидкости в пристенной пленке для труб в области дисперсно-кольцевого режима [1, 9, 13]:

$$\Psi = 1 - E_0 - \int_{x_0}^x \left(\frac{dE}{dx} \right) dx - \int_{x_0}^x dx. \quad (4)$$

Для определения расхода жидкости в пленке, как следует из уравнения (4), необходимы данные по граничным условиям E_0 , x_0 и по суммарной интенсивности массообмена $dE/dx = f(p, \rho w, x, q)$.

Граничные условия для решения (4) определяются следующим образом. Доля жидкости в ядре в точке x_0 определяется из условия, что тепловому потоку для случая $dE/dx = 0$ соответствует $x_{кр} = x_{гр}$ [11]. При условиях $dE/dx = 0$ и $\Psi = 0$ имеем

$$E_0 = E|_{x=x_0} = E|_{x=x_{гр}} = 1 - x_{гр}; \quad (5)$$

$$\Psi_{x=x_0} = x_{гр} - x_0.$$

Вторым граничным условием является равенство нулю расхода жидкости в пленке при наступлении кризиса теплоотдачи, т.е.

$$\psi = 0 \text{ или } E_0 = 1 - x_{кр} \quad (6)$$

при $x = x_{кр}$, $q = q_{кр}$.

Построив на диаграмме массопереноса точку E_0 и соединив ее с точками на линии полного расхода жидкости в канале, соответствующими критическим паросодержаниям при разных тепловых потоках, получим распределение жидкости в линейном приближении для тепловых потоков ($q = q_{кр}$, см. рис. 2).

Производная dE/dx , характеризующая интенсивность процессов массообмена, в линейном приближении определяется как

$$\frac{dE}{dx} = \frac{(1 - x_{кр} - E_0)}{x_{кр} - x_0} \quad (7)$$

Доли жидкости в ядре и пленке соответственно равны

$$E = \frac{dE}{dx}(x - x_0) + (1 - x_{гр}), \quad (8)$$

$$\psi = 1 - x - E. \quad (9)$$

Для удобства выполнения расчетов получены аппроксимирующие выражения для интенсивности суммарного массообмена dE/dx и для доли жидкости в точке x_0 в широком диапазоне режимных параметров:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{a_d}{a_x} (a_1 q - a_2 q^2 + a_3 q^3) \times \quad (10)$$

$$\times e^{0.26(1.8-p_0)-0.16w} - E_0 e^{-Fq(1-0.3wx)},$$

где $a_1 = 0.132 p_0 - 0.257 p_0^2 + 0.275 p_0^3 + 0.5$;

$$a_2 = 0.435 p_0 - 2 p_0^2 + 3.32 p_0^3 + 0.35$$
;

$$a_3 = 0.105 p_0 + 0.128 p_0^2 - 0.093 p_0^3 + 0.477 p_0^4$$
;

$$a_x = \frac{(0.3 \arccos(10^4(x-1+E_0)) \arccos(10^4(p_0-1.4)))}{(1/F-0.9)^2 + 1}$$
;

$$a_d = \left(\frac{8}{d}\right)^{-2.3}; \quad w = \frac{\rho w}{1000}; \quad p_0 = \frac{\rho}{100}.$$

Зависимость граничного паросодержания и доля жидкости в ядре в начале дисперсно-кольцевого режима выражена следующими зависимостями:

$$E_0 = (b_1 w + b_2 w^2 + b_3 w^3 + b_4 w^4) \times \quad (11)$$

$$\times e^{\frac{0.045(F-0.8)^2}{p_0+0.3} \left(\frac{d}{8} - 1\right)},$$

$$x_{гр} = 1 - E_0 \left(\frac{d}{8}\right)^{0.15} \left(\frac{1.55}{w} + 0.63\right), \quad (12)$$

$$F = 6.573w - 4.5075w^2 + \quad (13)$$

$$+ 1.055w^3 - 0.0825b_3w^4.$$

Коэффициенты b_1 , b_2 , b_3 и b_4 при разных значениях относительного давления p_0 представлены в таблице.

Коэффициенты b_1 , b_2 , b_3 и b_4

p_0	b_1	b_2	b_3	b_4
0.5	02797	-0.01	-0.009667	0.001
0.7	0.2486	0.04268	-0.02366	0.002333
0.8	0.3207	0.003244	-0.01566	0.00175
1	0.623	-0.2031	0.032	-0.001916
1.2	0.801	-0.3449	0.06902	-0.005086
1.3	0.9511	-0.4324	0.08783	-0.006583
1.4	1.0243	-0.5166	0.1107	-0.008418
1.5	1.1241	-0.632	0.1508	-0.01292
1.6	1.019	-0.5695	0.131	-0.0105
1.8	1.1343	-0.6674	0.1556	-0.01258
2.0	1.064	-0.5908	0.1262	-0.6094

Диаграмма массопереноса в области дисперсно-кольцевого режима течения

Для построения диаграммы массопереноса во всей области существования дисперсно-кольцевого режима для обогреваемых каналов совместим диаграммы массопереноса для не обогреваемых каналов (см. рис. 1) и для обогреваемых каналов (см. рис. 2). Общей точкой является точка, где суммарный массообмен равен нулю $dE/dx = 0$. Предполагается, что количество жидкости в пленке до точки x_0 не зависит от плотности теплового потока, а определяется динамическим уносом жидкости. Последнее подтверждается в опытах по распределению жидкости между ядром потока и пристенной пленкой в трубах. Расход жидкости в пленке от начала дисперсно-кольцевого режима до точки x_0 определяется на основе зависимостей (1)–(3). После точки x_0 количество жидкости в пленке определяется на основе зависимости (4). Кризис теплоотдачи при $x \geq x_0$

происходит при полном истощении пристенной пленки. В области паросодержаний $x < x_0$ кризис теплоотдачи может происходить при наличии расхода жидкости в пристенной пленке. В этом случае, как отмечено в работе [14], кризис теплоотдачи может быть объяснен испарением основы пленки между гребнями волн. При паросодержаниях $x < x_{д.к.}$ вблизи формирования снарядного режима течения или в области паросодержаний, близких к нулевым значениям, следует ожидать изменения механизма кризиса теплоотдачи.

Одной из возможных причин ухудшения теплоотдачи в этой области может быть переход пузырькового кипения в пленочное.

Качественный вид диаграммы массопереноса и соответствующей зависимости критического теплового потока от массового паросодержания показан на рис. 3.

Определение расхода жидкости в пристенных пленках и кризиса теплоотдачи на поверхностях твэл в сборках

Известно, что зависимость $q_{кр} = f(x)$ для сборок имеет качественно такой же характер как и для труб. В координатах «критический тепловой поток – среднее по сечению массовое паросодержание $q_{кр} = f(x)$ » данные для пучков лежат, как правило, ниже, чем для труб [15]. Одна из главных причин такого отличия связана с неравномерностью распределения расхода и паросодержания по сечению сборки. При определении запасов до кризиса теплоотдачи используют эмпирические зависимости $q_{кр}$ от среднего паросодержания. В некоторых зависимостях используют различные поправки, учитывающие особенности сборки. Очевидно, что учет действительного распределения расхода и паросодержания в ячейках позволит правильно определить значения критических тепловых потоков в сборке. Последнее возможно сделать на основе программ по-ячейкового расчета.

При определении момента наступления кризиса теплоотдачи на поверхностях твэлов предполагается, что кризис теплоотдачи имеет мес-

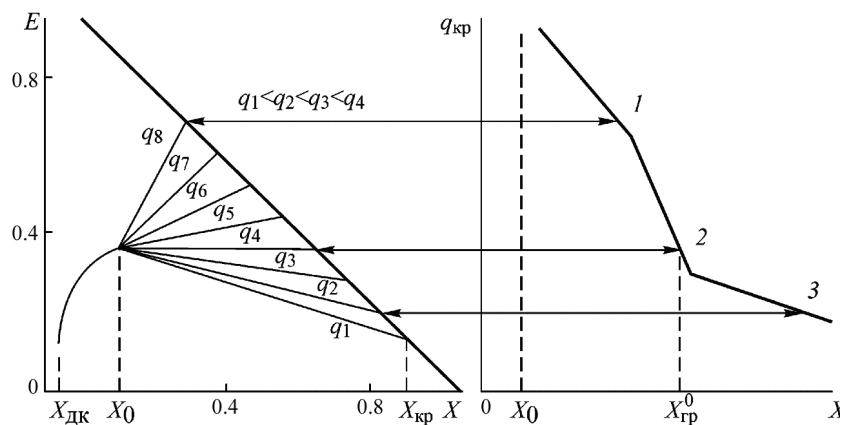


Рис. 3. Качественный вид диаграммы массопереноса и соответствующей зависимости критического теплового потока от массового паросодержания: 1 – область преобладающего уноса жидкости из пленки; 2 – переходная область; 3 – область преобладающего орошения

то при полном истощении пристенной пленки на поверхности твэлов.

Исходные данные для определения расходов жидкости на поверхностях твэлов (массовое паросодержание, давление, массовая скорость) определяются на основе расчетов по межъячейковой программе и/или экспериментов. В данном случае исходные данные были взяты из экспериментов [16, 17].

При определении расхода жидкости в пленках ячейка заменяется эквивалентной трубой. Массовые паросодержания x в ячейках задавались на основе экспериментальных значений, полученных методом изокинетического отбора [16, 17]. На рис. 4 показано поперечное сечение сборки и ячейки, в которых проводилось определение жидкостной и паровой составляющих [17].

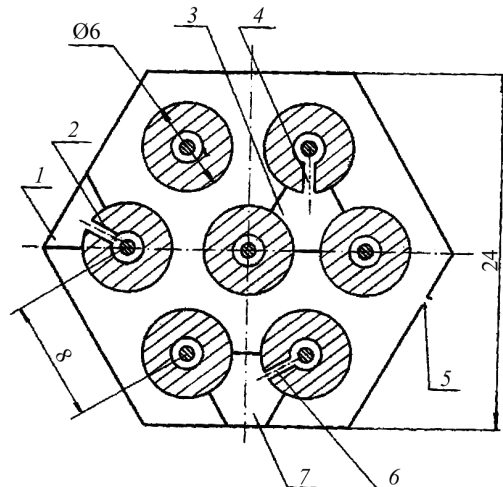


Рис. 4. Сечение пучка стержней. Ячейки: 1 – угловая, 3 – центральная, 7 – боковая. 2, 4 – отборы статического давления; 5 – отбор статического давления с корпуса

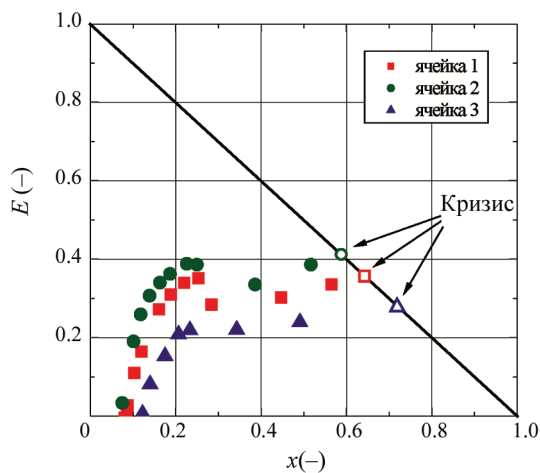


Рис. 5. Относительный расход жидкости в ядре потока, $p = 6$ МПа, $\rho_w = 1000$ кг/(м²с). Ячейки: 1 – центральная, 2 – боковая, 3 – угловая. Паросодержание на выходе пучка при наступлении кризиса $x_{п} = 0.57\text{--}0.53$

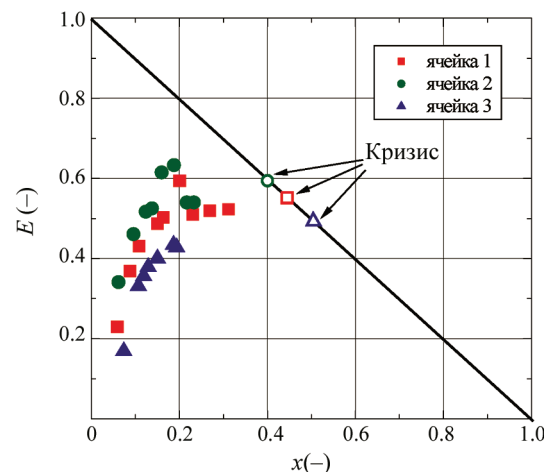


Рис. 8. Относительный расход жидкости в ядре потока, $p = 6$ МПа, $\rho_w = 2000$ кг/(м²с). Ячейки: 1 – центральная, 2 – боковая, 3 – угловая. Паросодержание на выходе пучка при наступлении кризиса $x_{п} = 0.35\text{--}0.36$

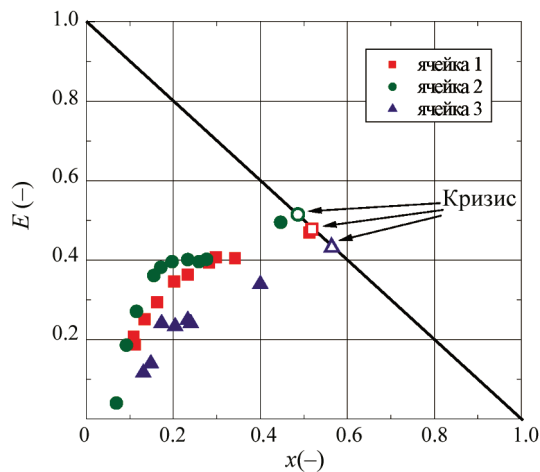


Рис. 6. Относительный расход жидкости в ядре потока, $p = 9$ МПа, $\rho_w = 1000$ кг/(м²с). Ячейки: 1 – центральная, 2 – боковая, 3 – угловая. Паросодержание на выходе пучка при наступлении кризиса $x_{п} = 0.513\text{--}0.401$

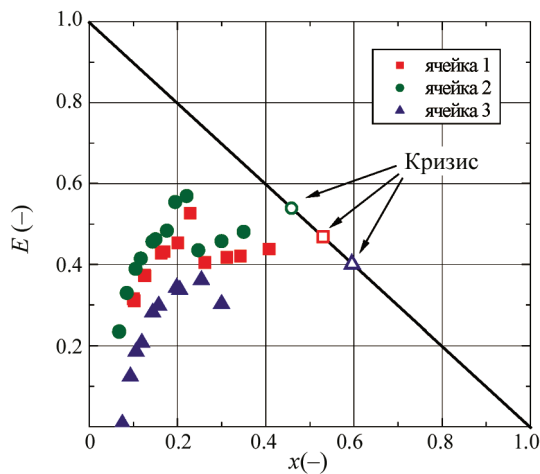


Рис. 7. Относительный расход жидкости в ядре потока, $p = 6$ МПа, $\rho_w = 1500$ кг/(м²с). Ячейки: 1 – центральная, 2 – боковая, 3 – угловая. Паросодержание на выходе пучка при наступлении кризиса $x_{п} = 0.389\text{--}0.391$

На рис. 5–8 представлены результаты расчетов расходов жидкости в пленках на поверхностях твэл в ячейках 7-стержневой сборки. Расчет доли жидкости в ядре E и пристенной пленке ψ выполнен на основе зависимости (4).

Сравнение расчетных расходов жидкости в ядре и полных расходов жидкости в ячейках (измеренных методом изокинетического отбора) вблизи линии полного расхода показывает, что расчетные и экспериментальные значения достаточно близки. Последнее позволяет утверждать, что при корректно заданном паросодержании (определенном экспериментально) методика расчета жидкости в пристенной пленке на поверхностях твэлов позволяет правильно определить расходы жидкости в пленках и, соответственно, определить наступление кризиса теплоотдачи.

В работе [17] момент наступления кризиса теплоотдачи определялся путем фиксации температуры стенки имитаторов твэл. При этом ячейка, в которой фиксировался кризис, не определялась. Значения паросодержаний на выходе пучка при наступлении кризиса приведены в подрисуночных подписях (см. рис. 5–8). Как видно, совпадение расчетных и экспериментальных значений $x_{п}$ удовлетворительное.

Заключение

1. Построена диаграмма массопереноса в области дисперсно-кольцевого режима течения двухфазной смеси. От точки начала дисперсно-кольцевого режима течения $x_{д.к.}$ до точки x_0 , где

суммарный массообмен $dE/dx = 0$, доля жидкости в пленке определяется на основе зависимостей, полученных в условиях гидродинамически равновесного течения. От точки x_0 до линии полного расхода жидкости в канале распределение жидкости определяется на основе данных о суммарном массообмене $dE/dx = f(p, \rho w, x, q)$.

2. Выполнены расчеты расходов жидкости в пленках на поверхностях твэл в характерных ячейках 7-стержневой сборки. Ячейки заменялись эквивалентными трубами. Массовые паросодержания x заданы на основе экспериментальных значений, полученных методом изокинетического отбора. Сравнение расчетных расходов жидкости в ядре и полных расходов жидкости в ячейках (измеренных методом изокинетического отбора) вблизи линии полного расхода показывает, что расчетные и экспериментальные значения достаточно близки. Совпадение расчетных и экспериментальных значений паросодержаний x_p на выходе пучка при наступлении кризиса удовлетворительное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтенко Э.А. Кризис теплоотдачи и распределение жидкости в парогенерирующих каналах. М.: Радуга, 2015. 280 с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 396 с.
3. Ягов В.В., Минко М.В. Расчет доли унесенной жидкости в адиабатных дисперсно-кольцевых потоках при низком расходе в пленке // Теплоэнергетика. 2016. № 4. С. 60–65.
4. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. Пер. с англ. М.: Энергия. 1974. 408 с.
5. Минко М.В. Исследование механизмов процесса и разработка методов расчета теплообмена двухфазных потоков в каналах: Дис... канд. техн. М.: НИУ МЭИ, 2012. 155 с.
6. Казновский С.П., Пометько Р.С., Пашичев В.В. Исследование распределения жидкости в дисперсно-кольцевом режиме течения в трубе при низком давлении. Препринт ФЭИ-432, 1973. 13 с.
7. Болтенко Э.А., Горбань Л.М., Пашичев В.В., Песков О.Л., Пометько Р.С. Распределение жидкости между ядром потока и пристенной пленкой при дисперсно-кольцевом режиме течения воды и фреона-12 в необогреваемых трубах. Препринт ФЭИ-847, 1978. 12 с.
8. Милашенко В.И. Измерение расходов фаз в дисперсно-кольцевом пароводяном потоке. В сб. «Вопросы газотермодинамики энергоустановок». Вып.3. Харьков, 1976. С. 21–28.
9. Болтенко Э.А., Пометько Р.С. Расход жидкости в пристенной пленке при дисперсно-кольцевом режиме течения воды и фреона-12 в трубе // Теплофизика высоких температур. 1979. Т. 17. № 3. С. 321–325.
10. Нигматулин Б.И. Кризис теплоотдачи и расход жидкости в пленке при течении дисперсно-кольцевого потока // Теплофизика высоких температур. 1979. Т. 17. № 6. С. 563–567.
11. Дорожук В.Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. М.: Энергоатомиздат. 1983. 256 с.
12. Болтенко Э.А., Песков О.Л., Пометько Р.С. Расход жидкости в ядре дисперсно-кольцевого потока и кризис теплоотдачи: Препринт ФЭИ №983. Обнинск. 1980. 15 с.
13. А.С. 803646 СССР, МКИ³G01N25/00. Способ определения количества жидкости в пристенной пленке двухфазного потока / Э.А. Болтенко, Р.С. Пометько // Заявка № 2830442 от 08.10.79. Открытия. Изобретения. 1986. № 45.
14. Казновский С.П., Пометько Р.С., Пашичев В.В. Механизм кризиса теплоотдачи при паросодержаниях $X \angle X_{gr}$ в дисперсно-кольцевом режиме течения. Препринт ФЭИ-432, 1973. 13 с.
15. Смолин В.Н., Поляков В.К. Критический тепловой поток при продольном обтекании пучка стержней // Теплоэнергетика. 1967. № 4. С. 21–27.
16. Архипов А.П., Орнатский А.П., Маевский Е.М. Исследование распределения массовой скорости и энтальпии потока по сечению семистержневого пучка // Теплоэнергетика. 1981. № 10. С. 64–66.
17. Архипов А.П. Исследование распределения теплогидравлических параметров потока в пучках цилиндрических тепловыделяющих стержней. Дисс... канд. техн. наук. Киев, 1981. 181 с.

Heat transfer crisis and fluid distribution in bundles of rods in the area of dispersed-annular flow mode

E.A. Boltenko, M.V. Davydov

*Electrogorsk Research and Engineering Center on NPP safety, Electrogorsk, Moscow region, 142530, Russia
e-mail: boltenko@erec.ru*

The article presents the results of earlier performed studies on the fluid consumption in the near-wall film in conditions equilibrium phase distribution. A mass transfer diagram for non-heated channels was plotted. The technique for determining the amount of liquid in the near-wall film of a two-phase dispersed-annular flow on the heat-release surface for pipes is described. The technique is based on the experimentally established unique dependence of the total mass exchange between the flow core and near-wall film and critical heat flows values in the area of the dispersed-annular mode; fluid consumption in the flow core and film with boundary

conditions in the beginning of the dispersed-annular mode and parameters in the place of the heat transfer crisis origin.

This method is based on the experimentally established explicit relationship between the intensity of the total mass transfer between the flow core and the wall film and the critical heat fluxes in the region of the dispersed-annular regime, between the fluid flow rates in the flow core and the film and the boundary conditions at the beginning of the formation of the dispersed-annular regime and the parameters at the site of the heat transfer crisis. The dependences for determining the fraction of liquid in a wall film for pipes in the area of the dispersed-annular mode are presented. A mass transfer diagram was plotted in the entire area of the dispersed-annular mode existence for heated channels. An approach, on which basis technique elaboration for computing heat transfer crisis in assemblies is possible, is described. Calculations of fluid consumption in the films of the fuel element surfaces in characteristic cells of a seven-rod assembly were performed. Mass steam contents x were set based on the experimental values, obtained by the isokinetic sampling technique. Comparison of the calculated liquid flow rates in the core and the total liquid flow rates in the cells (measured by the isokinetic sampling technique) near the total flow consumption line reveals that the calculated and experimental values are quite close. A satisfactory agreement was obtained between the calculated and experimental values of the steam content x_n at the bundle outlet.

Keywords: mass transfer diagram, dispersed-annular mode, flow core, critical heat flux, heat transfer crisis, flow-rates in film, seven-rod assembly, isokinetic sampling method.

REFERENCES

1. **Boltenko E.A.** *Krizis Teplootdachi i Raspredelenie Zhidkosti v Parogeneriruyushhikh Kanalakh* [Heat transfer crisis and fluid distribution in steam generating channels]. Moscow: Raduga, 2015. 280 p. In Russ.
2. **Nigmatulin R.I.** *Dinamika Mnogofaznykh Sred* [The dynamics of multiphase media]. Moscow: Nauka, 1987. 359 p. In Russ.
3. **Yagov V.V., Minko M.V.** Entrained liquid fraction calculation in adiabatic disperse-annular flows at low rate in film. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 4, pp. 288–293.
4. **Hewitt G.F., Hall-Taylor N.S.** *Annular Two-Phase Flow*. Oxford, Pergamon Press, 1970, 310 p. (Russ. ed. Hewitt G.F., Hall-Taylor N.S. *Kol'tsevye dvukhfaznye techeniya*. Moscow: Energiya, 1974. 408 p.)
5. **Minko M.V.** *Issledovanie mekhanizmov protsessa i razrabotka metodov rascheta teploobmena dvukhfaznykh potokov v kanalakh*. Diss. cand. tech. nauk [Study of the mechanisms of the process and development of methods for calculating the heat transfer of two-phase flows in channels. PhD thesis]. Moscow, MPEI, 2012. 155 p. In Russ.
6. **Kaznovsky S.P., Pometko R.S., Pashichev V.V.** *Issledovanie raspredeleniya zhidkosti v dispersno-kol'tsevom rezhime techeniya v trube pri nizkom davlenii* [The study of the distribution of liquid in the dispersed-annular mode of flow in the pipe at low pressure]. Preprint FEI-432, IPPE, Obninsk, 1973. 12 p. In Russ.
7. **Boltenko E.A., Gorban L.M., Pashichev V.V., Peskov O.L., Pometko R.S.** *Raspredelenie zhidkosti mezhdu yadrom potoka i pristennoj plenke pri dispersno-kol'tsevom rezhime techeniya vody i freona-12 v neobogrevaemykh trubakh* [The distribution of fluid between the core of the stream and the wall film in the dispersed-annular mode of flow of water and freon-12 in unheated pipes]. Preprint FEI-847, Obninsk, 1978. 12 p. In Russ.
8. **Milashenko V.I.** *Izmerenie raskhodov faz v dispersno-kol'tsevom parovodyanom potoke* [Phase flow rate measurement in a dispersed-annular steam-water flow]. *Voprosy gazotermodynamiki ehnergoustanovok* [Issues of gas thermodynamics of power plants]. Kharkiv, 1976, issue 3, pp. 21–28. In Russ.
9. **Boltenko E.A., Pometko R.S.** *Raskhod zhidkosti v pristennoj plenke pri dispersno-kol'tsevom rezhime techeniya vody i freona-12 v trube* [The flow rate of the liquid in the wall film during the dispersed-annular flow regime of water and freon-12 in the pipe]. *Teplofizika visokih temperatur – High temperature*, 1979, vol. 17, no. 3, pp. 563–567. In Russ.
10. **Nigmatulin B.I.** *Heat-transfer crisis and discharge of liquid in a film during passage of dispersed-annular flows*. *High Temperature*, 1979, vol. 17, no. 6, pp. 1040–1044.
11. **Doroshuk V.E.** *Krizisy teploobmena pri kipenii vody v trubakh* [Heat exchange crises during boiling water in pipes]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 256 p. In Russ.
12. **Boltenko E.A., Peskov O.L., Pometko R.S.** *Raskhod zhidkosti v yadre dispersno-kol'tsevogo potoka i krizis teplootdachi* [Liquid flow rate in the core of a dispersed-annular flow and heat transfer crisis]. Preprint FEI-983, Obninsk, 1980. 15 p. In Russ.
13. **Boltenko E.A., Pometko R.S.** *Sposob opredeleniya kolichestva zhidkosti v pristennoj plenke dvukhfaznogo potoka* [The method of determining the amount of liquid in the wall film of a two-phase flow]. Patent USSR no. 803646, 1979. In Russ.
14. **Kaznovsky S.P., Pometko R.S., Pashichev V.V.** *Mekhanizm krizisa teplootdachi pri parosoderzhanii X X_{gr} v dispersno-kol'tsevom rezhime techeniya* [The mechanism of heat transfer crisis at a steam quality $x < x_{gr}$ in a dispersed-annular flow regime]. Preprint FEI-432, Obninsk, 1973. 13 p. In Russ.
15. **Smolin V.N., Poliakov V.K.** *Kriticheskij teplovoj potok pri prodol'nom obtekanii puchka sterzhnej* [Critical heat flux during longitudinal flow around a bundle of rods]. *Teploenergetika – Teploenergetika*, 1967, no. 4, pp. 21–27. In Russ.
16. **Arhipov A.P., Ornatskiy A.P., Mayevskiy E.M.** *Issledovanie raspredeleniya massovoj skorosti i ehntal'pii potoka po secheniyu semisterzhnevo puchka* [Study into the distribution mass and enthalpy flow in the cross section of a 7-rod fuel assembly]. *Teploenergetika – Teploenergetika*, 1981, no. 7, pp. 64–66. In Russ.
17. **Arhipov A.P.** *Issledovanie raspredeleniya teplogidravlicheskih parametrov potoka v puchkakh tsilindricheskikh teplovydelyayushhikh sterzhnej*. Diss. kand. tekhn. nauk [Study of distribution of thermohydraulic flow parameters in bundles of cylindrical fuel rods. PhD thesis]. Kiyev, 1981. 181 p. In Russ.