

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Э. А. Болтенко, О. Л. Песков, Р. С. Пометько, Распределение жидкости и явление кризиса теплоотдачи в дисперсно-кольцевом режиме течения при неравномерном тепловыделении по длине, *ТВТ*, 1982, том 20, выпуск 2, 296–303

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.89

14 января 2025 г., 08:50:37



УДК 536.24

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ЯВЛЕНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ В ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИИ ПО ДЛИНЕ

Болтенко Э. А., Песков О. Л., Пометъко Р. С.

Приведены результаты экспериментального исследования распределения жидкости в трубах с неравномерным тепловыделением по длине при течении фреона-12. На основании анализа экспериментальных результатов по распределению жидкости в трубах при дисперсно-кольцевом режиме течения и данных по кризису теплоотдачи при равномерном тепловыделении по длине предложен метод расчета кризиса теплоотдачи для каналов с неравномерным тепловыделением по длине, использующий в качестве основы данные по распределению жидкости между ядром потока и пленкой для труб с равномерным тепловыделением по длине. Показано, что расход жидкости в ядре потока и пристенной пленке зависит от уровня теплового потока и степени неравномерности тепловыделения.

В настоящее время имеется значительный объем данных по распределению жидкости между ядром потока и пленкой в дисперсно-кольцевом режиме течения в трубах с равномерным тепловыделением по длине [1—3]. Однако авторам не известны работы, где бы исследовалось такое распределение жидкости при неравномерном тепловыделении по длине канала. Последняя информация необходима для более глубокого понимания закономерностей теплоотдачи и разработки физически обоснованных методов его расчета в каналах с реальными законами тепловыделения. В данной работе обсуждаются полученные экспериментальные результаты по распределению жидкости при неравномерном тепловыделении по длине и один из возможных путей их использования в расчетном методе.

Для дальнейшего необходимы основные результаты предшествующих работ, проведенных при равномерном тепловыделении по длине. В частности, анализ результатов [2, 4] показал, что в начале дисперсно-кольцевого режима течения распределения жидкости при различных тепловых потоках практически совпадают. С увеличением паросодержания в области дисперсно-кольцевого режима в зависимости от величины теплового потока и режимных параметров преобладающими процессами массообмена могут быть как унос, так и орошение [2]. Кризис теплоотдачи во всем исследованном диапазоне параметров определяется полным истощением пленки жидкости на обогреваемой поверхности [2]. Качественно диаграмма массопереноса приближенно может быть представлена линейными зависимостями (рис. 1, а).

Сопоставление диаграммы распределения жидкости с зависимостью критического теплового потока от паросодержания приводит к выводу о существовании области тепловых потоков, в которой суммарный массообмен практически равен нулю. Эта область соответствует зоне резкого изменения характера зависимости $q_{кр}(x_1)$ при $x_{1кр} = x_{1гр}$. Качественный характер распределения жидкости для соответствующих областей $q_{кр}(x_1)$ представлен на рис. 1, а, б.

Представленные на рис. 1, а, б качественные зависимости относятся к случаю равномерного тепловыделения по длине. Влияние закона тепловыделения на критические параметры является в настоящее время бесспорным фактом. В этой связи не вызывает сомнений, что и распределение жидкости может существенно отличаться от случаев, исследованных ранее [2]. Для выяснения закономерностей влияния закона тепловыделения на распределение жидкости опыты проведены на трубах с двухступенчатым тепловыделением по длине.

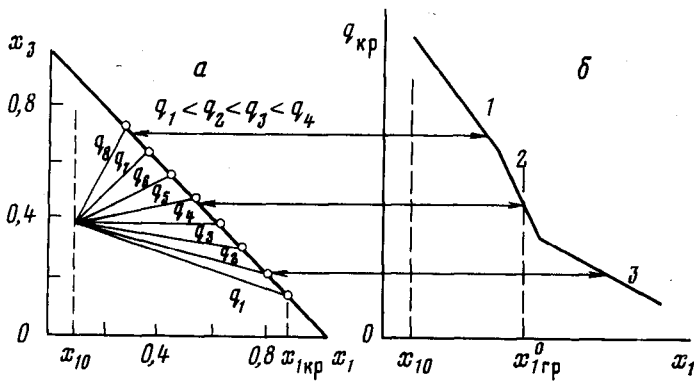


Рис. 1. Качественный вид диаграммы массопереноса и соответствующей зависимости критического теплового потока от массового расходного паросодержания

Результаты экспериментального исследования распределения жидкости между ядром потока и пленкой представлены на рис. 2—4. Как следует из приведенных графических зависимостей, расход жидкости в ядре потока и пристенной пленке сложным образом зависит от теплового потока и степени неравномерности q_1/q_2 . Для труб с двухступенчатым тепловыделением при $q_1/q_2 < 1$ (максимум теплового потока на выходе из канала) кризис теплоотдачи возникает всегда на выходе канала, а критическая мощность трубы меньше или равна критической мощности трубы с равномерным тепловыделением. Очевидно, это различие мощностей связано с особенностями процесса массообмена между ядром потока и пристенной пленкой. Сказанное подтверждается данными, приведенными на рис. 2, где представлено изменение относительного расхода жидкости в ядре потока для двух случаев двухступенчатого тепловыделения по длине (тепловые потоки и длины второй ступени различны). При этом тепловой поток на первой ступени сохранялся неизменным и равным $0,056 \text{ МВт/м}^2$. На первой ступени значение теплового потока соответствует зоне преобладающего орошения, т. е. при этом тепловом потоке количество жидкости, выпавшей на стенку трубы, преобладает, хотя и незначительно, над количеством жидкости, унесенной в ядро потока. Величины тепловых потоков на второй ступени соответствуют зоне преобладающего уноса жидкости из пленки. При переходе на вторую ступень суммарный массообмен между ядром потока и пристенной пленкой устанавливается равным для канала с равномерным тепловыделением при тепловом потоке $q=q_2$. При этом практически сразу же на втором участке достигается интенсивность массообмена, соответствующая значению $q=q_2$ для канала с равномерным тепловыделением по длине.

На рис. 3 представлены результаты экспериментального исследования массообмена между ядром потока и пристенной пленкой при $q_1/q_2 > 1$ (максимум теплового потока на входе в канал). В этом случае в зависимости от длины второй ступени и значения теплового потока величина суммарного массообмена $J = -q/r \cdot dx_3/dx_1$ на второй ступени существенно отличается от величины суммарного массообмена для канала с равномерным тепловыделением при этом же тепловом потоке. Если при равномерном тепловыделении суммарный массообмен соответствует случаю преобладающего уноса $J < 0$, то суммарный массообмен на второй ступени характерен для случая преобладающего орошения $J > 0$. Изменение направления суммарного массообмена, как будет показано ниже, объясняется различием расходов жидкости в ядре потока и паросодержаний при одинаковых расходах жидкости в пленке.

Результаты проведенных экспериментальных исследований могут быть положены в основу метода расчета кризиса теплоотдачи в каналах с неравномерным тепловыделением по длине. Как будет ясно из дальнейшего, выбранный авторами путь решения этой задачи заключается в двух мо-

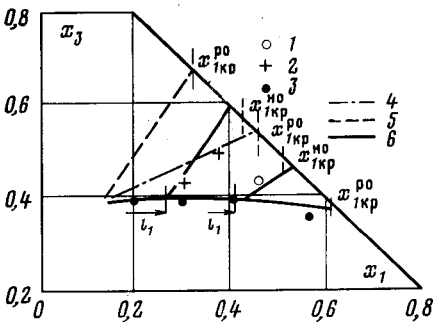


Рис. 2

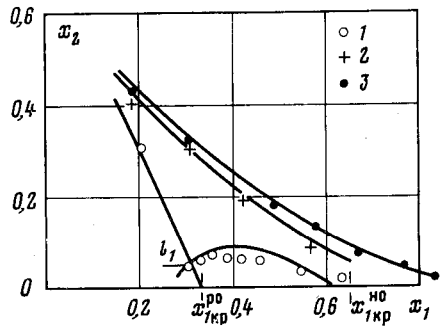


Рис. 4

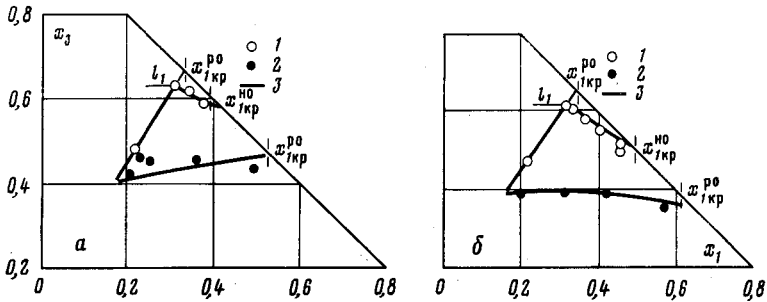


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость доли жидкости в ядре потока от массового паросодержания (фреон-12, $p=1,06$ МПа, $\rho_w=1000$ кг/м²·с). Двухступенчатое тепловыделение ($q_1=0,056$ МВт/м²): 1 - $q_2=0,154$ МВт/м²; $l_2=0,15$ м; 2 - 0,21; 0,2. Равномерное тепловыделение: 3 - $q=0,056$ МВт/м²; 4 - 0,154; 5 - 0,21; 6 - расчет

Рис. 3. Зависимость доли жидкости в ядре потока x_3 от массового паросодержания (фреон-12, $p=1,06$ МПа, $\rho_w=1000$ кг/м²·с, $d=8$ мм): а: 1 - двухступенчатое тепловыделение, $q_1=0,18$ МВт/м², $q_2=0,107$, $l_2=0,2$ м; 2 - равномерное тепловыделение, $q=0,107$ МВт/м²; 3 - расчет; б: 1 - $q_1=0,18$ МВт/м², $q_2=0,056$, $l_2=0,8$ м; 2 - равномерное тепловыделение, $q=0,056$ МВт/м²; 3 - расчет

Рис. 4. Зависимость доли жидкости в пленке от массового паросодержания (фреон-12, $p=1,06$ МПа, $\rho_w=1000$ кг/м²·с, $d=8$ мм): 1 - двухступенчатое тепловыделение, $q_1=0,18$ МВт/м², $q_2=0,028$, $l_2=3,18$ м; 2 - равномерное тепловыделение, $q=0,056$ МВт/м²; 3 - расчет

ментах: 1) получении распределения жидкости для каналов с равномерным тепловыделением по длине; 2) способе перехода от распределения жидкости в таких каналах к распределению жидкости в каналах с произвольным неравномерным тепловыделением.

Наиболее простой подход к решению первого вопроса заключается в описании полученных экспериментальных распределений соответствующими зависимостями. Такой путь не вызывает сомнений, однако он серьезно сужает возможности и полезность метода в целом. Действительно, получить распределение жидкости для канала с равномерным тепловыделением по длине задача не менее простая, чем определить критические параметры для ряда законов тепловыделения по длине. В связи с этим было бы весьма желательно получить распределение жидкости для канала, не прибегая каждый раз к измерению последних. Такой путь представляется возможным при анализе связи распределения жидкости с зависимостью $q_{кр}(x_1)$ для равномерного тепловыделения (рис. 1).

В качестве основы используем уравнение баланса расхода жидкости в пленке

$$\frac{1}{\pi d} \frac{dG_{пл}}{dz} = \left(m_{ор} - m_m - m_{кр} - \frac{q}{r} \right). \quad (1)$$

Для его решения необходимы данные по локальному уносу и орошению, границам подавления и начала кипения в пленке и т. д. Такие данные для обогреваемых каналов практически отсутствуют. Можно сказать,

что исследования составляющих массообмена m_{op} , m_m , m_k в настоящее время находятся в начальной стадии. Основная часть работ по исследованию распределения фаз выполнена в газожидкостных или парожидкостных потоках при низких давлениях и в узком диапазоне изменения режимных параметров. Применение этих данных для расчета кризиса теплоотдачи не всегда обосновано и может привести к неправильным выводам.

Уравнение сохранения расхода жидкости в ядре запишем в виде

$$-\frac{1}{\pi d} \frac{dG_{ж}}{dz} = (m_{op} - m_m - m_k). \quad (2)$$

Подставляя это выражение в уравнение (1) и приводя его к безразмерному виду, получим

$$dx_2 = -dx_3 - dx_1. \quad (3)$$

Проинтегрировав (3) от начала дисперсно-кольцевого режима течения до значения x_1 , получим

$$x_2 = 1 - x_{30} - \int_{x_{10}}^{x_1} \frac{dx_3}{dx_1} dx_1 - x_1. \quad (4)$$

Таким образом, для определения расхода жидкости в пленке, как следует из (4), необходимы данные по граничным условиям x_{30} , x_{10} и по суммарной интенсивности массообмена

$$dx_3/dx_1 = f(p, \rho w, x_1, q). \quad (5)$$

Проведенный выше анализ распределения жидкости совместно с зависимостью $q_{кр}(x_1)$ показал, что тепловому потоку для случая $dx_3/dx_1 = 0$ соответствует критическое паросодержание $x_{1кр} = x_{1гр}$. Используя это положение, определим долю жидкости в ядре потока в начале дисперсно-кольцевого режима течения x_{30} . Согласно (4), при условиях $dx_3/dx_1 = 0$ и $x_2 = 0$ имеем

$$x_{30} = x_3/x_1 = x_{10} = x_3/x_1 = x_{1гр} = 1 - x_{1гр}. \quad (6)$$

Для определения начала дисперсно-кольцевого режима может быть использована формула [5]

$$x_{10} = 0,75 \rho'' / (\rho' + \rho''). \quad (7)$$

Учитывая, что возникновение кризиса теплоотдачи обусловлено полным испарением пленки жидкости, приходим к граничному условию для расхода жидкости в ядре потока в сечении кризиса теплоотдачи

$$x_3 = 1 - x_{1кр} \text{ при } x_1 = x_{1кр}, \quad q = q_{кр}. \quad (8)$$

Построив на диаграмме массопереноса точку $x_3(x_1 = x_{10}) = x_{30}$ и соединив ее с точками на линии полного расхода жидкости в канале, соответствующими критическими паросодержаниями при разных тепловых потоках, получим распределение жидкости в линейном приближении для тепловых потоков $q = q_{кр}$ (рис. 1).

Производная dx_3/dx_1 , характеризующая интенсивность процессов массообмена в линейном приближении, определяется как

$$dx_3/dx_1 = (1 - x_{1кр} - x_{30}) / (x_{1кр} - x_{10}). \quad (9)$$

Доли жидкости в ядре потока и в пленке соответственно равны

$$x_3 = \frac{1 - x_{1кр} - x_{30}}{x_{1кр} - x_{10}} (x_1 - x_{10}) + x_{30}, \quad (10)$$

$$x_2 = 1 - x_1 - x_3. \quad (11)$$

Как следует из (9), производная dx_3/dx_1 зависит от критического паросодержания, которое, в свою очередь, связано с тепловым потоком и другими параметрами, т. е. $x_{1кр} = x_1(q, \rho w, p, d \dots)$. Имея расчетную зависимость $x_{1кр} = x_1(q, \rho w, p, d \dots)$ (или опытные данные по кризису теплоотдачи) и подставив ее в формулу (9), получим уравнение для расчета распределения жидкости между ядром потока и пленкой.

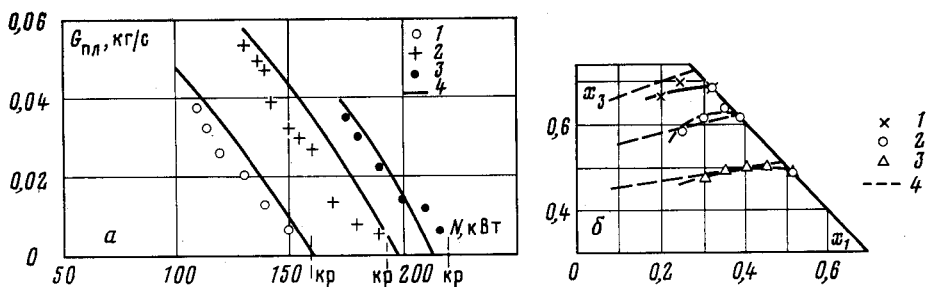


Рис. 5: а — зависимость расхода жидкости в пленке от мощности тепловыделения (вода, $p=6,86$ МПа, $d=12,7$ мм, $l=3,66$ м). Опытные данные [1]: 1 — $\rho w = 1360$ кг/м²·с; 2 — 2040; 3 — 2720; 4 — расчет; б — зависимость доли жидкости в ядре потока от массового паросодержания (вода, труба $d=12,7$ мм, $l=3,66$ м, $p=6,86$ МПа): опытные данные [1]: 1 — $\rho w = 2720$ кг/м²·с; 2 — 2040; 3 — 1360; 4 — расчет

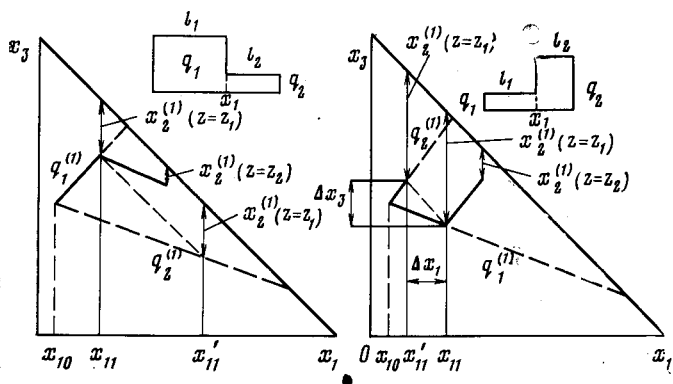


Рис. 6. Качественная зависимость доли жидкости в ядре потока для канала с двухступенчатым тепловыделением по длине

На практике, как правило, зависимости по кризису теплоотдачи даются в виде $\dot{q}_{кр} = f(x_1, \rho w, p, d \dots)$. В связи с этим они не всегда могут быть использованы в формулах (9)–(11). Для упрощения расчетов получены аппроксимирующие выражения для правой части формулы (9) для труб в широком диапазоне режимных параметров [4]. В качестве исходных данных для получения аппроксимирующей зависимости использовались экспериментальные результаты работы [6, 7].

На рис. 5 проведено сравнение данных по распределению жидкости между ядром потока и пленкой с расчетом по формуле (4) и при использовании аппроксимирующих зависимостей [4]. Отметим, что характер последних [4] несколько отличается от линейного, лучше соответствуя результатам измерений $x_3(x_1)$. Из сопоставления видно, что наблюдается качественное и количественное совпадение результатов расчета с экспериментом.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет определить долю жидкости в ядре дисперсно-кольцевого потока и в пристенной пленке для трубы с равномерным тепловыделением по длине. Тем самым, первая часть задачи решена. Перейдем ко второй — расчету критических параметров при неравномерном тепловыделении по длине.

При рассмотрении данного вопроса примем, что общая критическая мощность канала складывается из мощности, рассчитанной для области дисперсно-кольцевого режима течения, и мощности, выделенной на экономичном участке, т. е. сумма этих мощностей определяет общую критическую мощность. Ниже, для простоты иллюстрации метода, расчет проведен с сечения канала, в котором $x_1 = x_{10}$.

Рассмотрение задачи начнем с наиболее простого случая: двухступенчатого тепловыделения по длине. Пусть требуется определить критические параметры $x_{1кр}$, $q_{кр}$ (или $N_{кр}$) для такого канала при заданных режимных и геометрических параметрах. Используя описанный выше метод (9), (10),

найдем распределение жидкости при равномерном тепловыделении по длине и различных тепловых потоках, $x_2=f(q, x_1)$ или $x_2=(q, z)$. Зададим на канале некоторый уровень мощности N . При этом тепловой поток на первой ступени окажется равным q_1 , на второй — q_2 . Имея набор зависимостей $x_2(z, q)$, найдем расход жидкости в пленке в конце первой ступени $x_2(z=z_1)$ при $q=q_1$. Можно принять, что этот расход поступит на вход второй ступени, где тепловой поток $q=q_2$. Далее положим, что характер изменения расхода жидкости в пленке или доли жидкости в ядре на второй ступени будет таким же, как и для канала с равномерным тепловыделением по длине с уровнем теплового потока q_2 (рис. 6).

В результате проведенного расчета, например, можно получить, что на выходе второй ступени при заданном уровне мощности N расход жидкости в пленке не равен нулю, а равен $x_2(q_2, z_2)$ (рис. 6). Это означает, что заданный уровень мощности недостаточен для возникновения кризиса теплоотдачи. Расчеты продолжаются до тех пор, пока не будет найден уровень мощности N , при котором $x_2(z=z_2)=0$. Данная мощность и является критической для рассматриваемого канала.

Таким образом, содержание метода перехода к каналам с неравномерным тепловыделением заключается в том, что принимается: 1) расход жидкости в пленке изменяется непрерывно по длине канала; 2) интенсивность массообмена

$$J=dx_3/dx_1=f(x_2, q). \quad (12)$$

Проведенные оценки показали, что ошибка в выборе граничных условий x_{10} , x_{30} при таком построении расчетного метода весьма слабо сказывается на точности расчета критической мощности. Это объясняется тем, что при изменении граничных условий изменяется соответствующим образом производная dx_3/dx_1 и происходит достаточно эффективная компенсация погрешности выбора граничных условий (для каналов с равномерным тепловыделением по условию выбора такая компенсация является полной, поскольку всегда $x_2=0$ при $x_1=x_{1кр}$, $q=q_{кр}$). Среднеквадратичная ошибка определения критической мощности каналов с неравномерным тепловыделением по предложенной выше методике составляет, как правило, 5–7% [4]. Во всех случаях расчет дает место возникновению кризиса теплоотдачи на выходе из канала, что в ряде случаев при убывающем к выходу из канала тепловыделении не согласуется с экспериментом. Возникновение кризиса теплоотдачи на некотором расстоянии от выхода из канала означает, что вниз по потоку от этого сечения образуется пленка жидкости, т. е. количество выпадающей жидкости на пленку больше, нежели количество испаряющейся жидкости ($dx_3/dx_1 < -1$). Между тем, выражение (9) при всех тепловых потоках характеризуется условием $dx_3/dx_1 > -1$.

Как показано выше (рис. 2), для каналов с повышением теплового потока на выходе ($q_1/q_2 < 1$) при переходе от теплового потока q_1 на более высокий тепловой поток q_2 , соответствующий зоне преобладающего уноса жидкости из пленки при равномерном тепловыделении, суммарный массообмен между ядром потока и пленкой устанавливается равным для канала с равномерным тепловыделением при $q=q_2$, т. е. условие $J=f(x_2, q)$ выполняется. Для каналов с понижением теплового потока по длине ($q_1/q_2 > 1$) суммарный массообмен между ядром потока и пленкой отличается от величины суммарного массообмена для канала с равномерным тепловыделением при $q=q_2$ (рис. 3). В этом случае условие $J=f(x_2, q)$ является приближенным. Это связано с тем, что для процессов преобладающего орошения важную роль играет количество жидкости в ядре потока. При одинаковых расходах жидкости в пленке, но различных тепловых потоках паросодержания и расходы жидкости в ядре потока оказываются различными. Для обеспечения корректности метода расчета необходим учет возникающего различия в расходах жидкости в ядре потока Δx_3 и паросодержаний $\Delta x_1(z_1)$ (рис. 6). Такой учет может быть проведен на основе экспериментов по кризису теплоотдачи и распределению жидкости в трубах с неравномерным тепловыделением по длине.

Предположим, что поток жидкости, дополнительно выпадающей на

пристенную пленку, пропорционален разности концентраций жидкости в ядре потока при паросодержаниях x_{11} и x_{11}' . Паросодержание x_{11}' для канала с двухступенчатым тепловыделением может быть определено по формуле

$$x_{11}' = \left[x_{11} + \frac{dx_3}{dx_1} \Big|_{q=q_1} (x_{11} - x_{10}) + \frac{dx_3}{dx_1} \Big|_{q=q_2} x_{10} \right] / \left(1 + \frac{dx_3}{dx_1} \Big|_{q=q_2} \right), \quad (13)$$

вытекающей из условия $x_2|_{q=q_1} = x_2|_{q=q_2}$ при равномерном тепловыделении по длине. Обработка опытных данных по кризису теплоотдачи в каналах с неравномерным тепловыделением с учетом качественных особенностей распределения жидкости позволила получить зависимость для определения дополнительной составляющей орошения

$$\Delta J = 0,124(C - C') \left(\frac{\sigma}{\sqrt{\mu' \mu'' V''}} \right)^{1,5} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,2}, \quad (14)$$

где C и C' — безразмерные концентрации жидкости в ядре потока при паросодержаниях $x_I = x_{II}$ и x_{II}' , полученные соответственно при условии, что толщина пристенной пленки равна нулю, а скольжение капель относительно пара отсутствует

$$C = (1 - x_1) \rho'' / \rho'' (1 - x_1) + \rho' x_1. \quad (15)$$

Уравнение баланса жидкости в пленке с учетом дополнительного орошения (11) запишется в виде

$$x_2 = 1 - x_{30} - \int_{x_{10}}^{x_1} \left(\frac{dx_3}{dx_1} - \frac{\Delta J r}{1000q} \right) dx_1 - x_1. \quad (16)$$

Путем использования аналогичного подхода описанный способ расчета может быть легко распространен также на каналы с произвольным тепловыделением по длине.

На рис. 2–6 представлены результаты сравнения расчета расходов жидкости в ядре потока и пристенной пленке по предлагаемой методике с рассматриваемыми экспериментальными данными. Учет дополнительной составляющей орошения (14) приводит к удовлетворительной точности расчета не только критических мощностей (5–7%), но и места возникновения кризиса теплоотдачи в трубах с убывающим к выходу тепловыделением. Проверка показала, что предложенная зависимость (14) дает хорошие результаты и для таких особых случаев, как кризис теплоотдачи в трубах с необогреваемыми участками, а также изменение распределения жидкости в необогреваемых трубах при неравновесных начальных условиях.

Обозначения: p — давление; $x_1 = G_{II} / G$ — массовое расходное паросодержание; $x_2 = G_{пл} / G$ — доля жидкости в пристенной пленке; $x_3 = G_{я} / G$ — доля жидкости в ядре потока; r — скрытая теплота парообразования; q — тепловой поток; ρ — плотность; σ — поверхностное натяжение; μ — динамическая вязкость теплоносителя; V — скорость; J — поток массы между ядром потока и пристенной пленкой; z — текущая координата; m — поток массы; G — расход теплоносителя; d — диаметр трубы; ρw — массовая скорость. Индексы: ' — жидкость, '' — пар, кр — кризис теплоотдачи; п — пар; пл — пленка; я — ядро потока; ор — орошение; о — начало интегрирования; ро — равномерный обогрев; но — неравномерный обогрев; гр — граничное; м — механическое взаимодействие ядра потока и пленки.

Физико-энергетический институт
г. Обнинск

Поступила в редакцию
12.I.1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Bennett A. V., Hewitt G. F., Keelys R. K. F., Kearsley H. A. Measurement of Liquid flow-rates at 100 psia in upward steam-water flow in a vertical heated tube. — AERE—Rep. 5809, Harwell, 1969.
2. Болтенко Э. А., Пометько Р. С. Расход жидкости в пристенной пленке при дисперсно-кольцевом режиме течения воды и фреона-12 в трубе. — ТВТ, 1979, т. 17, № 3, с. 563.

3. *Нигматулин Б. И.* Кризис теплоотдачи и расход жидкости в пленке при течении дисперсно-кольцевых потоков. — ТВТ, 1979, т. 17, № 6, с. 1254.
4. *Болтенко Э. А., Песков О. Л., Пометько Р. С.* Расход жидкости в ядре дисперсно-кольцевого потока и кризис теплоотдачи. Препринт ФЭИ, № 983, Обнинск, 1980, с. 19.
5. *Смолин В. Н.* Модель механизма кризиса теплоотдачи при движении пароводяной смеси и методика расчета кризисных условий в трубчатых ТВЭЛах. — В кн.: Исследование критических тепловых потоков в пучках стержней в стационарных и нестационарных режимах теплообмена. СЭВ, семинар ТФ-74, М., 1974, с. 209.
6. Табличные данные для расчета кризиса теплоотдачи при кипении воды в равномерно-обогреваемых круглых трубах. — Теплоэнергетика, спр. материал, 1976, № 9, с. 90.
7. *Зенкевич Б. П., Песков О. Л., Сергеев Н. Д.* Кризис теплоотдачи при вынужденном течении воды в равномерно-обогреваемых длинных трубах. Препринт ФЭИ, № 254, Обнинск, 1971.