

УДК 536.423.1

Антипов В.Г.*Институт технической теплофизики НАН Украины***ПАРОСОДЕРЖАНИЕ В ОБЛАСТИ НЕРАВНОВЕСНОГО КИПЕНИЯ ВОДЫ**

Пропонується модель розрахунку профілю паровмісту по довжині парогенеруючого каналу, яка може бути використана для теплогидравлічних розрахунків елементів енергетичних установок. Використані експериментально визначені границі області нерівноважного кипіння.

Предлагается модель расчета профиля паросодержания по длине парогенерирующего канала, которая может использоваться в теплогидравлических расчетах элементов энергооборудования. Используются экспериментально определенные границы области неравновесного кипения.

The calculation of vapor void fraction profile along of steam-generating channel are proposed. This result can be used in the thermal-hydraulic calculations of the elements of power equipment. Experimentally determined boundaries of the non-equilibrium boiling are used.

D – гидравлический диаметр, м;
 h – энтальпия, кДж/кг;
 P – избыточное давление в контуре, МПа;
 q – тепловой поток, кВт/м²;
 r – удельная теплота парообразования, кДж/кг;
 T – температура, °С;
 s – коэффициент проскальзывания;
 $x_{\text{отн}}$ – относительная энтальпия;
 x – массовое паросодержание;
 F_r – число Фруда;
 β – объемное расходное паросодержание;
 ρ – плотность, кг/м³;
 w – массовая скорость, кг/м²с;
 ϕ – объемное паросодержание.

Индексы верхние:

' – на линии насыщения для жидкости;
 '' – на линии насыщения для пара.

Индексы нижние:

кр – критическая точка;
 нп – начало парообразования;
 п – парообразование;
 р – параметры при термодинамически равновесном состоянии;
 расч – расчетное значение;
 эксп – экспериментальное значение;
 ж – параметры для жидкости.

Для практических целей часто возникает потребность знания как локального, так и усредненного значения истинного паросодержания в области неравновесного кипения из-за того, что эта зона может охватывать большую часть обогреваемого канала. Но экспериментальный анализ ее затруднен вследствие относительно низких значений измеряемого параметра, что приводит к неконтролируемым погрешностям даже в том случае, когда используется уникальное оборудование [1].

Основой для построения моделей тепловых и гидродинамических явлений в каналах активной зоны реактора с двухфазным теплоносителем, является задание закона изменения паросодержания по поперечному сечению и вдоль оси канала. Для области равновесных (или квазиравновесных) потоков такое распре-

деление известно и существует достаточное количество экспериментальных результатов, позволяющих оценить надежность предлагаемых соотношений. Иначе выглядит ситуация в области исследования неравновесных двухфазных потоков.

К настоящему времени сложилось два основных направления в построении профиля паросодержания $x(x_{\text{отн}})$ в канале:

- распределение паросодержания находится как результат тепломассообмена, происходящего в канале (балансные модели);
- экспериментально определяется характер изменения ϕ в зависимости от режимных параметров (феноменологические или профильные модели).

Первое направление [5,6] характерно тем, что функция $x(x_{\text{отн}})$ не определяется в явном

виде, но отыскиваются ее значения как решения системы нелинейных уравнений. Для количественного определения большинства параметров, входящих в систему, авторы вынуждены использовать утверждения, которые не могут быть очевидными заранее.

Во втором направлении постулируется вид функции – решение задачи $x(x_{отн})$. Как правило, это решение записывается на основе известных опытных данных и не должно противоречить граничным условиям. Последние могут выбираться с некоторым произволом в зависимости от той области, для которой ищется решение задачи. Так, большинство авторов стремится построить функцию на отрезке «начало интенсивного парообразования – однофазное равновесное течение пара», т.е. на отрезке $x [x_{п}; 1]$. Тогда, если вид решения выбран правильно, одно граничное условие является строгим ($x = 1$ при $x_{отн} = 1$), а второе требует дополнительных утверждений относительно выбора точки «начала интенсивного парообразования», что не всегда согласуется с логикой явления. Таким образом, в профильных моделях нестрогие предположения могут относиться к выбору вида функции $x(x_{отн})$ и к утверждениям относительно граничных условий. Как правило, эти затруднения обходят с помощью анализа массивов опытных данных.

Для определения функции распределения паросодержания по каналу накоплен непротиворечивый в своей основе экспериментальный материал для двухфазных потоков в трубах и кольцевых каналах [2 – 12]. К таким исследованиям можно отнести и вид функциональной зависимости истинного объемного паросодержания от относительной энтальпии потока. На основании большинства опытных данных функция роста паросодержания при течении теплоносителя в канале с равномерным тепловыделением, показанная на рис. 1, может считаться физически обоснованной.

В области "неразвитого кипения" до некоторой точки $x_{п}$, где паросодержание не выходит за границы чувствительности измерительных средств (0,04...0,06), обычно полагают, что для большинства практических случаев величина

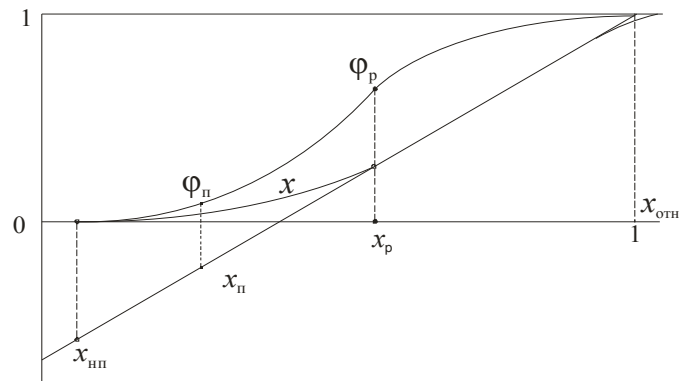


Рис. 1. Изменение истинного паросодержания в зависимости от относительной энтальпии.

развивающегося пристенного парового слоя не может оказать заметного влияния на общее паросодержание в канале, и принимают в этой области $\varphi = 0$.

В области "развитого кипения" паросодержание в потоке φ растет от некоторого начального значения $\varphi_{п}$ до величины, характерной для равновесного кипения в канале $\varphi_{р}$, подчиняясь зависимости, для которой на отрезке $[x_{п}; x_{р}]$ производная $d\varphi/dx_{отн}$ больше нуля. На основании этого можно предположить физически непротиворечивым такой профиль паросодержания, который удовлетворяет следующим условиям.

В области неравновесного кипения, где относительная энтальпия потока $x_{отн}$ меняется от значения $x_{нп}$ в сечении начала парообразования до значения $x_{р}$ в сечении перехода к равновесному состоянию, объемное паросодержание в канале φ растет от нуля до равновесной величины $\varphi_{р}$. Причем везде в этой области считается положительной вторая производная по относительной энтальпии $d^2\varphi/dx_{отн}^2$.

В области равновесного кипения ($x_{р} \leq x_{отн} \leq 1$) паросодержание φ меняется в зависимости от массового паросодержания x в соответствии с фундаментальным соотношением:

$$\varphi = (1 + (\rho''/\rho')s \cdot (1 - x)/x)^{-1}.$$

Здесь предполагается, что неравновесными эффектами при $x \approx 1$ у теплоотдающей стенки

можно пренебречь.

При использовании феноменологической модели в [2] рассматривается средняя энтальпия жидкости $h_{ж}$ как некоторая функция F от среднемассовой энтальпии потока h при условиях:

$$F = 1 \text{ при } h_{ж} = h_{п}, \quad (1)$$

$$F \rightarrow 0 \text{ при } h \gg h'. \quad (2)$$

Таким образом, функция распределения F охватывает двухфазную область, исключая так называемый «участок неразвитого кипения», в котором величина ϕ считается равной нулю. Тогда массовое паросодержание x может быть записано в форме, предложенной Леви [4]:

$$x = x_{отн} - x_{п} F = x_{отн} - x_{п} \exp(x_{отн}/x_{п} - 1),$$

или подобной ей.

Граничное условие (2) эквивалентно требованию $F \rightarrow 0$ при $x_{отн} \gg 0$, которое не соотносится с каким-либо определенным значением $x_{отн}$. Опытные данные указывают на стремление функции F к нулю при $x_{отн} \rightarrow x_p$, что существенно влияет на распределение паросодержания. Поэтому условия (1) и (2) предпочтительнее записать в другом виде:

$$F = 1 \text{ при } x_{отн} = x_{пп},$$

$$F = 0 \text{ при } x_{отн} = x_p,$$

ограничив область определения функции F значениями переменной от $x_{пп}$ до x_p .

Вводя для области неравновесного кипения распределение паросодержания в виде:

$$x = (x_{отн} - x_{пп})F_1, \quad (3)$$

где F_1 – некоторая функция, удовлетворяющая таким граничным условиям, при которых уравнение (3) принимает значения:

$$x = 0 \text{ при } x_{отн} = x_{пп},$$

$$x = x_p \text{ при } x_{отн} = x_p.$$

Тогда для F_1 на границах должны выпол-

няться условия:

$$F_1 \rightarrow 0 \text{ при } x_{отн} = x_{пп}, \quad (4)$$

$$F_1 = x_p / (x_p - x_{пп}) \text{ при } x_{отн} = x_p. \quad (5)$$

Если в качестве F_1 использовать экспоненциальную зависимость

$$F_1 = (x_p / (x_p - x_{пп})) \cdot \exp(n \cdot (x_p - x_{отн}) / (x_p - x_{пп})), \quad (6)$$

где n – коэффициент, подлежащий определению, то распределение массового паросодержания по длине канала примет вид:

$$x = x_p \cdot (1 - \bar{x}) \cdot \exp(n\bar{x}). \quad (7)$$

Здесь вводится новая переменная

$$\bar{x} = (x_p - x_{отн}) / (x_p - x_{пп}).$$

Для определения постоянной n можно воспользоваться тем, что генерация пара в канале однозначно определяется из уравнения (7):

$$dx/dx_{отн} = (1 - n(1 - \bar{x})) \cdot (x_p / (x_p - x_{пп})) \cdot \exp(n\bar{x}). \quad (8)$$

Учитывая, что для равномерно обогреваемого канала генерация пара при переходе к равновесному кипению стремится к постоянному значению в сечении, где $x_{отн} = x_p$, и учитывая условие (5), получим уравнение для определения параметра n :

$$(1 - n) x_p / (x_p - x_{пп}) = 1,$$

откуда следует, что $n = x_{пп} / x_p$.

Нетрудно убедиться, что генерация пара (8) на границе $x_{отн} = x_{пп}$ будет стремиться к величине много меньшей единицы. Для этого достаточно, чтобы коэффициент n по абсолютной величине был не менее трех, что всегда выполняется для большинства режимов. Экспериментально показано [13], что при $P = \text{const}$ отношение $n = x_{пп} / x_p$ есть величина постоянная:

$$x_{пп} / x_p \approx -7,6(P/P_{кр} + 0,5). \quad (9)$$

Отсюда, для давления 7 МПа $n = -6,2$ и при этом $dx/dx_{отн} = 0,0003$, для давления 16 МПа

$$n = -9,5, \text{ а } dx/dx_{\text{отн}} = 7,3 \cdot 10^{-6}.$$

Окончательно, методика расчета распределения паросодержания по длине канала с теплоподводом будет выглядеть следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_p (1 - \bar{x}) \exp(\bar{x} \cdot x_{\text{нп}} / x_p) \text{ при } x_{\text{нп}} \leq x_{\text{отн}} \leq x_p, \\ \varphi &= (1 + s \cdot [(1 - x)/x] \cdot (\rho''/\rho_{\text{ж}}))^{-1}, \\ s &= 1 + (0,6 + 1,5\beta^2)(1 - P/P_{\text{кр}}) \text{Fr}^{0,25}, \\ \beta &= (1 + (\rho''/\rho_{\text{ж}}) \cdot (1 - x)/x)^{-1}, \\ \text{Fr} &= (\rho w)^2 / (\rho')^2 \cdot 1 / (gD), \\ x &= x_{\text{отн}} \text{ при } x_p \leq x_{\text{отн}} \leq 1, \\ \varphi &= (1 + s \cdot [(1 - x)/x] \cdot (\rho''/\rho'))^{-1}, \\ \beta &= (1 + (\rho''/\rho') \cdot (1 - x)/x)^{-1}, \end{aligned} \right\} (10)$$

$$\text{где } \bar{x} = (x_p - x_{\text{отн}}) / (x_p - x_{\text{нп}}),$$

$$x_{\text{нп}} = -530(P/P_{\text{кр}} + 0,5)q/\rho w r,$$

$$x_p = 4,6(15,4 - P/P_{\text{кр}})q/\rho w r.$$

В описанной методике вместо неопределенной относительной энтальпии в сечении «начала интенсивного парообразования» используется энтальпия в сечении начала парообразования на стенке [13]. Формальная граница между "развитым" и "неразвитым" кипением в неравновесной области игнорируется и предполагается лишь монотонное поведение функции распределения (7) в зависимости от относительной энтальпии потока.

Точность предсказания объемного паросодержания в канале в предлагаемой модели, как и следует ожидать, прямо зависит от достоверности определения граничных значений $x_{\text{нп}}$ и x_p . Анализ экспериментальных данных и соотношений, полученных с помощью различных методик, проведен в работе [13], где определены наиболее подходящие зависимости для границ области неравновесного кипения.

Коэффициент проскальзывания s , входящий в формулу для вычисления φ , заимствован из работы [7] и удовлетворяет подавляющему числу данных не только для каналов с

пучком стержней, но и для отдельной трубы и кольцевой щели. На широкую применимость принятого выражения для s указывают и авторы работы [8]. Кроме того, влияние этого параметра на точность расчета функции $\varphi(x)$ ничтожно в неравновесной области и заметно сказывается только при положительных относительных энтальпиях. Поэтому нет оснований отказываться от использования такого соотношения во всей области двухфазного течения.

Оценка соответствия распределения (10) экспериментальным данным проводилась для массива опытных значений $\varphi_{\text{экс}}(x_{\text{отн}})$, полученных в НИКИЭТ [12] в области изменения давления от 3 до 18 МПа и для массовых скоростей от 500 до 3000 кг/м²с. Получена хорошая сходимость, а наиболее вероятные значения отклонений истинного объемного паросодержания φ по всему массиву данных находятся в пределах погрешности эксперимента $\pm (0,04 \dots 0,06)$.

Наибольшее отклонение дает сравнение расчета с данными, полученными при низких массовых скоростях. На рисунках 2 и 3 представлены некоторые результаты измерений паросодержания для массовых скоростей 50, 100 и 200 кг/м²с [12]. Основываясь на экспериментальных данных при низких массовых скоростях, авторы предположили существование инверсии в описании точки начала парообразования $x_{\text{нп}}$ в сторону уменьшения ее абсолютной величины с уменьшением массовой скорости, что приводит к более резкому росту паросодержания на начальном участке вблизи точки $x = 0$. Но из опытов по определению распределения паросодержания при ошибке $\pm 0,06$ невозможно с достаточной точностью определить границу, где паросодержание приближается к нулю, и, следовательно, получить доказательства существования инверсии в поведении $x_{\text{нп}}$. Кроме этого, при проведении исследований границы начала парообразования при несколько больших массовых скоростях от 150 до 500 кг/м²с не обнаружены отклонения от общей закономерности поведения границы $x_{\text{нп}}$ [13].

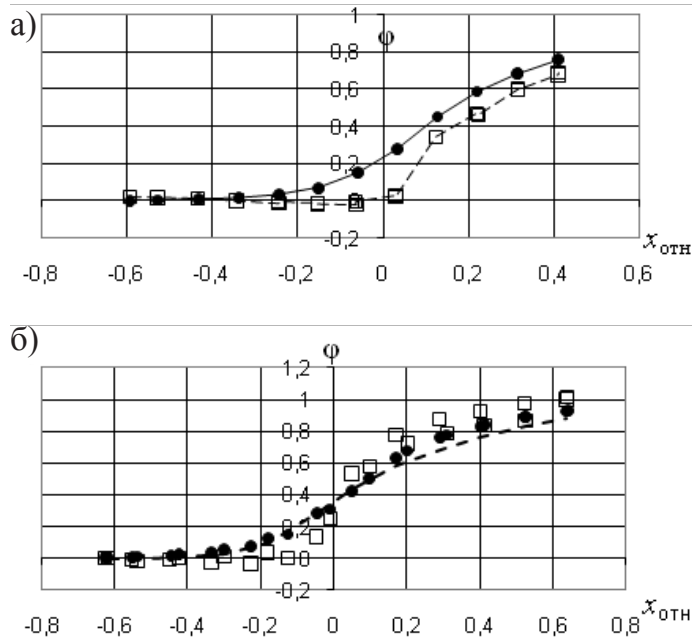


Рис. 2. Изменение объемного паросодержания в обогреваемой трубе ($d = 0,022$ м) при $P = 70$ бар:
 $q = 0,1$ МВт/м², $\rho_w = 50$ кг/м²с (а);
 $q = 0,5$ МВт/м², $\rho_w = 200$ кг/м²с (б):
 □ – эксперимент [12]; ● – расчет по (10),
 --- расчет по [12].

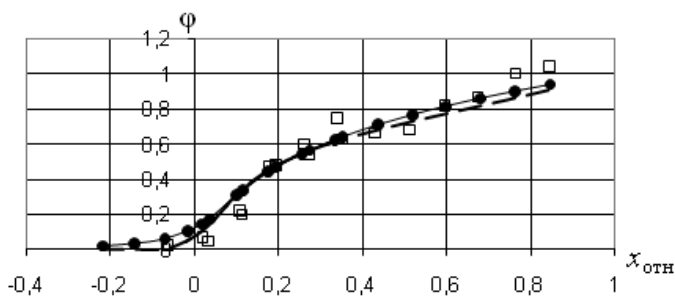


Рис. 3. Изменение объемного паросодержания в обогреваемой трубе ($d = 0,022$ м) при $P = 160$ бар, $q = 0,11$ МВт/м², $\rho_w = 100$ кг/м²с:
 □ – эксперимент [12]; ● – расчет по (10),
 --- расчет по [12].

Возвращаясь к рисункам 2 и 3 и учитывая сказанное выше, можно предполагать, что расчет по модели (10) дает непротиворечивый результат и для низких массовых скоростей, а положение расчетной кривой относительно опытных значений на рис. 2, а может показать-

ся более предпочтительным, чем обобщение авторов.

Для канала с переменным по длине тепловым потоком может быть использована модифицированная расчетная модель, отличающаяся введением локальных значений основных параметров по z :

$$x_{\text{отн}} = x_{\text{вх}} + 4/\rho_w r \int_0^z q(z) dz,$$

$$x_{\text{нп}} = -530 \cdot (P/P_{\text{кр}} + 0,5) \cdot q(z) / (\rho_w r),$$

$$x_p = 4,6(15,4 - P/P_{\text{кр}}) \cdot q(z) / (\rho_w r).$$

Выводы

Предложенная модель расчета распределения среднего по сечению истинного паросодержания вдоль парогенерирующего канала не предполагает использования итерационных методов и основана на экспериментально определенных граничных значениях относительной энтальпии потока.

Расчетную модель (10) рекомендуется использовать для определения профиля паросодержания вдоль круглых и кольцевых каналов в области изменения режимных параметров: $P = 20 \dots 200$ МПа, $\rho_w = 150 \dots 3500$ кг/м²с, $q = 0,1 \dots 4$ МВт/м².

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов И.Я., Юрова Л.Н., Смолин В.Н. и др. Использование нейтронного датчика для определения паросодержания // Атомная энергия. – 1977. Т. 43, вып. 3. – С. 171-175.
2. Zuber N., F.W. Staub and Bijwaard. Vapor Void Fractions in Subcooled Boiling and Saturated Boiling Systems. Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf. – 1966. № 8, pp. 24-38.
3. Saha P. and Zuber N. // Proc. V Int. Heat Transfer Conf. – Tokyo. – 1974. – В. 4.7.
4. Levy S. // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1967. – V. 10. – pp. 351-365.
5. Молочников Ю.С., Баташова Г.Н., Михайлов В.Н. и др. Обобщение экспериментальных данных по истинным объемным паросодержаниям при кипении воды с недогревом // Теплоэнергетика. – 1982. – № 7. – С. 47-50.

6. *Плютинский В.И., Павлов С.П.* Методика расчета истинного паросодержания при кипении с недогревом в стационарных и нестационарных режимах // Теплоэнергетика. – 1987. – № 2. – С. 12-17.
7. *Osmachkin V.S., Borisov V.D.* Pressure Drop and Heat Transfer for Flow of Boiling Water in Vertical Rod Bundles. Proc. IV Int. Heat Transfer Conf. – 1970. – В. 4.9.
8. *Скачек М.А., Борздов Е.Г.* Коэффициент скольжения при напорном движении пароводяной смеси в вертикальном канале // Тр. МЭИ. – 1979. – вып.407. – С. 27-28.
9. *Бартоломей Г.Г., Брантов В.Г., Молочников Ю.С. и др.* Экспериментальное исследование истинного объемного паросодержания при кипении с недогревом в трубах // Теплоэнергетика. – 1982. – № 3. – С. 20-22.
10. *Бартоломей Г.Г., Баташова Г.Н., Брантов В.Г. и др.* Паросодержание diabатных потоков в трубах при различных законах обогрева // Теплообмен IV. – 1980. – Т. V. – С. 38-43.
11. *Молочников Ю.С., Баташова Г.Н.* Истинное паросодержание при кипении воды с недогревом в трубах. // Достижения в области исследования теплообмена и гидравлики двухфазных потоков в элементах энергооборудования – Л.: Наука. – 1973. – С. 79-96.
12. *Громова И.И., Есиков В.И., Коромыслов А.В., Смолин В.Н.* Методика расчета истинного объемного паросодержания в парогенерирующих трубах // Материалы семинара ТФ–86 стран СЭВ – 1986.
13. *Антипов В.Г.* Экспериментальное определение границ области неравновесного кипения в парогенерирующем канале. // Пром. теплотехника. 2011. – № 6. – С. 25 – 31.

Получено 06.10.2011 г.