УДК 536.248.2
Скицко А.И.
Институт технической теплофизики НАН Украины

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ПАРОВОДЯНОГО ПОТОКА В КАНАЛЕ ПРИ НАГРЕВЕ ТЕПЛООТДАЮЩЕЙ СТЕНКИ

$A_{межф}$ – площадь поверхности раздела для единицы объема;
d_b – диаметр пузырька;
F – объемное межжидкостное трение;
F_b – выталкивающие силы;
g – вектор силы тяжести;
h – энтальпия;
r – радиальная координата;
T – температура;
u – вектор скорости;
u_r – касательная скорость скольжения;
v – компонент окружной скорости;
w – компонент осевой скорости;
α – обьемная доля;
ρ – плотность;
μ –вязкость;
λ – коэффициент теплоотдачи;
Pr – число Прандтля;
Re –число Рейнольдса;
ΔH – скрытая теплота парообразования;

Индексы:
G – газовая фаза;
i – газовая или жидкостная фаза;
j – газовая или жидкостная фаза;
L – жидкостная фаза.

Целью работы является численное исследование двухфазного (пароводяного) вертикального потока, в парогенерирующем канале. Была предложена усовершенствованная двумерная осесимметричная математическая модель. На основе предложенной модели проведены расчеты двухфазного (пароводяного) вертикального потока, в осесимметричном канале.

Расчет истинных объемных паросодержаний важен для проектирования ядерных реакторов, парогенераторов, теплообменников и различных силовых генерирующих систем [1].

В ряде случаев, помимо коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых нагрузок, возникает необходимость в определении одной из важнейших характеристик пароводяного потока – истинного паросодержания в зависимости от режимных параметров в обогреваемом канале, таких как тепловая нагрузка, давление, степень недогрева жидкости и т.д.

Знание истинных объемных паросодержаний также необходимо для создания моделей кризиса теплообмена и расчета критических тепловых потоков. При движении недогретой жидкости внутри обогреваемого канала на некотором расстоянии от входа возникает поверхностное кипение. Прогрев всей массы жидкости по мере движения ее по каналу приводит к нарастанию размеров кипящего слоя и увеличению паросодержания вдоль канала. Предсказание профиля объёмного паросодержания, режима течения, поля температур и распределение по скоростям позволит оптимизировать анализ многих систем.

Физическая модель

В канал с диаметром d_0 и длиной l_0 входит поток воды, под действием перепада давления на входе и выходе поток воды движется с заданной скоростью. Постоянный тепловой поток подводился к стенкам канала.

В работе рассмотрен случай когда недогретая жидкость входит в обогреваемый канал, начинает кипеть и на выходе канала наблюдается двухфазная смесь жидкости и пара.

Математическая модель

В каждой расчетной ячейке сумма объемных фракций фаз составляет единицу.

Задача расчета двухфазного потока решается в осесимметричной постановке, поэтому модель уравнения может быть представлена в цилиндрических координатах. Модель включает:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_i \alpha_i w_i) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho_i \alpha_i \upsilon_i) = M_{i-межф}, \quad (1)$$

где α_i – объемная фракция среды в вычислительной ячейке, ρ_i – ее плотность, w_i и v_i – компоненты осевой и радиальной скорости соответственно, нижние индексы i и j представляют фазы и определяют величину жидкости и пара в этой задаче. $M_{i\text{-}межф}$ в уравнении (1) представляет интенсивность массообмена между двумя фазами. $M_{i\text{-межф}}$ вычисляется по следующей зависимости:

$$M_{G-межф} = M_{L-межф} = $$
$$= \frac{\lambda_G A_{межф}(T_G - T_{нас}) - \lambda_L A_{межф}(T_L - T_{нас})}{\Delta H}, \qquad (2)$$

где λ_L и λ_G – коэффициенты теплоотдачи на пароводяной поверхности раздела. Коэффициенты λ_L и λ_G определены по зависимостям [2], ΔH – теплота парообразования при данном давлении, $A_{межф}$ – площадь поверхности раздела для единицы объема:

$$A_{межф} = \frac{6\alpha}{d_p}, \qquad (3)$$

где d_p – диаметр пузырька, равен 1мм [3].
Осевая составляющая уравнения движения:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_i\alpha_i w_i^2) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho_i\alpha_i w_i \upsilon_i) =$$
$$= -\alpha_i\frac{\partial p}{\partial z} + F(w_j - w_i) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\alpha\mu_{эфф}\frac{\partial w_i}{\partial r}) +$$
$$+ \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_i\mu_{эфф}\frac{\partial w_i}{\partial z}) + F_b, \qquad (4)$$

Радиальная составляющая уравнения движения:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_i\alpha_i w_i \upsilon_i) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho_i\alpha_i \upsilon_i^2) =$$
$$= -\alpha_i\frac{\partial p}{\partial z} + F(\upsilon_j - \upsilon_i) +$$
$$+ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\alpha\mu_{эфф}\frac{\partial \upsilon_i}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_i\mu_{эфф}\frac{\partial \upsilon_i}{\partial z}), \qquad (5)$$

где

$$F_b = \rho r g, \qquad (6)$$

где g – ускорение свободного падения,
F – в обоих уравнениях представляет собой межфазное трение:

$$F = 0,75\frac{c_d\rho_L\alpha_L\alpha_G}{d_b}|u_r|, \qquad (7)$$

где c_d – коэффициент трения, u_r – скорость скольжения.

Эффективная вязкость в уравнении определяется следующим выражением:

$$\mu_{эфф} = \mu_m + \mu_л, \qquad (8)$$

где μ_m – турбулентная вязкость, $\mu_л$ – молекулярная вязкость.

$$\mu_m = \frac{c_\mu\rho_L k^2}{\varepsilon}, \qquad (9)$$

в формулах k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации, c_μ =0,09. Для определения величин k и ε используются следующие уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_L\alpha_L w_L\kappa) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho_L\alpha_L\upsilon_L\kappa) =$$
$$= \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\alpha_L\Gamma_\kappa\frac{\partial\kappa}{\partial r}) + S_\kappa, \qquad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_L\alpha_L w_L\varepsilon) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho_L\alpha_L\upsilon_L\varepsilon) =$$
$$= \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\alpha_L\Gamma_\varepsilon\frac{\partial\varepsilon}{\partial r}) + S_\varepsilon, \qquad (11)$$

где Γ_κ и Γ_ε являются коэффициентами диффузии и выражаются как:

$$\Gamma_\kappa = \mu_л\frac{\mu_m}{\sigma_\kappa}, \qquad (12)$$

$$\Gamma_\varepsilon = \mu_л\frac{\mu_m}{\sigma_\varepsilon}, \qquad (13)$$

σ_κ и σ_ε – числа Шмидта для к и ε соответственно. S_κ и S_ε являются исходными членами и представляются:

$$S_\kappa = \rho r_L\alpha_L(G_\kappa - \varepsilon) + \alpha_L G_{\kappa b}, \qquad (14)$$

$$S_\varepsilon = \rho_L\alpha_L\frac{\varepsilon}{\kappa}(C_1G_\kappa - C_2\varepsilon) + \alpha_L c_L G_{\kappa b}\frac{\varepsilon}{\kappa}, \qquad (15)$$

G_κ – генерации турбулентной энергии, выражается как:

$$G_\kappa = \mu_m\left\{\left(\frac{\partial\omega_1}{\partial r} + \frac{\partial\upsilon_1}{\partial z}\right)^2 + 2\left[\left(\frac{\partial\omega_1}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial\upsilon_1}{\partial r}\right)^2\right]\right\}, \qquad (16)$$

В уравнениях (15) и (16) вторые слагаемые – это источниковые члены. Лопес де Бертодано [4] предложил следующее выражение:

$$G_{\kappa b} = 0.75\frac{c_b c_d\rho_1\alpha_1\alpha_2}{d_b}|u_r|^3, \qquad (17)$$

где u_r – касательная скорость,

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_w}{\rho_1}\right)^{0,5}, \qquad (18)$$

τ_w – касательное напряжение на стенке.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_i\alpha_i w_i h_i) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho_i\alpha_i\upsilon_i h_i) =$$
$$= \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\alpha\frac{\mu_{эфф}}{\Pr_{эфф}}\frac{\partial h_i}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_i\frac{\mu_{эфф}}{\Pr_{эфф}}\frac{\partial h_i}{\partial z}) + S_{i-межф}, \qquad (19)$$

где $Pr_{эфф}$ – эффективное число Прандтля, которое включает в себя молекулярные и турбулентные составляющие и $S_{i\text{-}межф}$ представляет передачу энергии между двумя фазами на поверхности раздела.

$$S_{i-межф} = \lambda_i A_{i-межф}(T_i - T_{нас}) + M_{i-межф}(h_i - h_{нас}), \quad (20)$$

где h_i и $h_{нас}$ – энтальпия фазы и энтальпия насыщения соответственно.

Результаты моделирования

На основе разработанной модели были проведены расчеты двухфазного (пароводяного) вертикального потока, который входит в осесимметричный канал со степенью недогрева Т – 212 ºС. Параметры потока на входе были следующими скорость потока 0,5 м/с, давление 1 МПа. Предложенная модель позволяет рассчитывать осредненные и пульсационные характеристики двухфазных турбулентных потоков. Однако, учитывая важность такой характеристики двухфазного потока как локальное объемное паросодержание, основное внимание было уделено расчету именно этой величины. Для сравнения были проведены расчеты и для ламинарного двухфазного потока, когда в математической модели турбулентные коэффициенты переноса приравнивались нулю. Анализ полученных данных показывает, что результаты моделирования с учетом турбулентного переноса лучше согласуются с экспериментальными данными. Этот факт правильно отражает природу двухфазного потока, так как в практически важных случаях двухфазный пароводяной потока является турбулентным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин И.Г.* Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. Москва. – 1986.

2. *Rosten H., Spalding D.* Phoenics Manual, CHAM, TR/100". – London. – 1986.

3. *Lai J. Farouk B.* Numerical Simulation of Subcooled Boiling and Heat Transfer in a Vertical Ducts. – International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1993. – P.1541-1551.

4. *Lopez de Bertodano M., Lahey R.T., Jones O.C.* Phase Distribution in Bubbly Two Phase Flow in Vertical Ducts. – International Journal of Multiphase Flow. – 1994. – P. 805-818

Эпик Э.Я.

Национальный технический университет Украины «КПИ»

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА ПЛОСКИХ ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ТУРБУЛИЗИРУЮЩИМИ ЭФФЕКТАМИ

Проведен обзор экспериментальных исследований по теплообмену и гидродинамике перспективных плоских оребренных поверхностей, используемых в компактных теплообменниках и системах охлаждения элементов РЭА и ПК. Интенсификация теплообмена до 3 раз достигается за счет прерывания пограничного слоя на поверхности ребра и дополнительной турбулизации потока. Ниже рассмотрены следующие эффективные виды оребрения:

- ребра трапецеидальной формы с многочисленными перфорациями и сдвигом по фазе [1], образующие каналы диффузорно-конфузорного типа. Рост теплоотдачи обусловлен возникновением вторичных течений через перфорации («эффект дыхания») и прерыванием (по мнению авторов) пограничного слоя только при каждом поджатии.

- плоские ребра с «винглетами» в виде пары пластин, установленных на ребре под углом к потоку и создающих периодические расширения и поджатия потока [2]. Интенсификация теплообмена связана с наличием диффузорно-конфузорного эффекта, прерыванием пограничного слоя, индуцированием за винглетами вихрей, усилением перемешивания в зазоре между винглетами.

- ребра со смещением [3]. Интенсификация теплообмена вызывается периодическим развитием ламинарных пограничных слоев на прерываемых участках ребер и в меньшей степени их частичной диссипацией в следах за ребрами.

- ребра, разрезанные на лепестки [4, 5]. Интенсификация теплообмена достигается вследствие развития псевдоламинарного пограничного слоя по длине «лепестка», а также благодаря периодическому воздействию срывов потока с задних кромок «лепестков» на структуру потока в зазоре