

## Приборы и оборудование

УДК 664.002.5

### Моделирование гидравлических режимов кольцевых парожидкостных течений

*Василенко С.М., Форсюк А.В.,  
Бондарь В.И., Майстренко И.А.*

*Национальный университет пищевых технологий, Киев*

По результатам анализа экспериментальных данных предложена зависимость для определения величины эквивалентной шероховатости межфазной поверхности в парожидкостных кольцевых потоках. Разработана методика расчета приведенного коэффициента гидравлического сопротивления и касательного напряжения на межфазной поверхности, необходимого для замыкания модели теплопереноса в пленках жидкости.

**Ключевые слова:** гидродинамика, шероховатость, кольцевые течения, коэффициент сопротивления, касательное напряжение.

За результатами аналізу експериментальних даних запропоновано залежність для визначення величини еквівалентної шорсткості міжфазної поверхні у парорідинних кільцевих потоках. Розроблено методику розрахунку приведенного коефіцієнта гідравлічного опору й дотичного напруження на міжфазній поверхні, необхідного для замикання моделі теплопереносу у плівках рідини.

**Ключові слова:** гідродинаміка, шорсткість, кільцеві течії, коефіцієнт опору, дотичне напруження.

Основу математических моделей теплообмена в кольцевых парожидкостных потоках составляют дифференциальные уравнения переноса количества движения и энергии в пленке, а также соответствующие гидродинамические и тепловые граничные условия. К числу гидродинамических условий следует отнести: а) граничные условия первого рода, которые определяют относительную скорость жидкости на границе с твердой поверхностью, согласно условию «прилипания», равной нулю; б) граничные условия второго рода, которые задают значение касательного напряжения на поверхности раздела жидкость — пар. Аналитический расчет межфаз-

ного касательного напряжения вследствие сложности физической картины процесса в настоящее время провести не представляется возможным, что связано, в первую очередь, с тем, что интенсивность и характер межфазного взаимодействия определяются сложной нерегулярной волновой структурой на поверхности пленки. Его определение может быть осуществлено при помощи экспериментальных исследований.

Для решения этой задачи на кафедре промышленной теплоэнергетики Национального университета пищевых технологий были осуществлены эксперименты по выпариванию яблочных соков с поверхности пленки, которая сте-

кала по внутренней поверхности вертикальной трубы длиной 3 м и внутренним диаметром 0,028 м. Давление вторичного пара изменялось в пределах 0,03–0,07 МПа; локальная скорость вторичного пара — 0–60 м/с; пленочное число Рейнольдса — 200–1400; массовое содержание сухих веществ — 10–60 %. При проведении экспериментов измерялись перепад давлений вторичного пара на входе и выходе трубы, а также изменение температуры вторичного пара по ее длине. Изменение расходных характеристик парожидкостной смеси находилось из тепловых балансов отдельных участков экспериментальной трубы длиной 0,5 м каждый. В опытах определенные на отдельных участках усредненные по длине значения параметров принимались условно постоянными (дискретно-локальными).

При обработке результатов экспериментов вследствие сложности формирования аналитической задачи движения кольцевых парогазовых потоков действенным инструментом остается анализ размерностей теории подобия. Однако в этом случае возникает сложная задача нахождения множества факторов и параметров течения для определения универсальной системы безразмерностных комплексов при обобщении экспериментальных данных.

Большинство исследователей в качестве определяемого безразмерностного параметра принимают так называемый приведенный коэффициент гидравлического сопротивления парового ядра. Основная же разница методик представления результатов экспериментальных исследований заключается в способе выбора системы определяющих чисел подобия.

Наиболее удобной и широко распространенной является система определяющих чисел подобия, которые включают расходные характеристики фаз. Расчет по методикам разных авторов, которые на ней базируются, свидетельствует об их качественном соответствии и разрешает выделить три области с характерным влиянием взаимодействия фаз на приведенный коэффициент гидравлического сопротивления. Во-первых, режим слабого взаимодействия, когда пленка мало влияет на течение газового ядра, и поэтому коэффициенты гидравлического сопротивления близки к расчетным для случая течения в сухой гидравлически гладкой трубе. Во-вторых, режим умеренной интенсивности взаимодействия фаз с ростом скорости парового ядра, когда возрастает коэффициент гидравлического сопротивления. Это вызывается изменением волновой структуры на поверхности пленки жидкости, ростом амплитуды волн и соответственно ростом шероховатости межфазной

поверхности [1]. В-третьих, режим сильной интенсивности взаимодействия фаз, когда значительное касательное напряжение приводит к разрушению гребней волн, уменьшению их максимальной высоты, дальнейшему изменению волновой структуры и, как следствие, уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления с увеличением скорости газа.

Соотношения для расчета приведенного коэффициента гидравлического сопротивления парового ядра  $f_{ia}$  в областях умеренной 1 и сильной 2 интенсивностей взаимодействия фаз приведены ниже при разных условиях эксперимента.

При  $D = 0,05$  м,  $L = 3,2$  м [2]:

$$\begin{aligned} f_{ia} &= 3,68 \cdot 10^{-7} Re_r^{0,582} Re_{de}^{0,705}; \\ f_{ia} &= 0,3 Re_r^{-0,468} Re_{de}^{0,517}. \end{aligned} \quad (1)$$

При  $D = 0,034$  м,  $L = 2,6$  м [3]:

$$\begin{aligned} f_{ia} &= f_r [1 + 2,95 \cdot 10^{-20} Re_r (x/d)^{0,812} \times \\ &\quad \times Ga_\sigma^{1,6} Re_\delta^{1,77} (v_{ж}^{2/3}/g_d^{1/3})^{0,55}]; \\ f_{ia} &= f_r [1 + 9,56 Ga_\sigma^{-0,705} We^{0,32} Re_\delta^{0,75}] \times \\ &\quad \times [1 + 5,33 (x/d)^{-2,5}]. \end{aligned} \quad (2)$$

При  $D = 0,025$  м,  $L = 2,0$  м [4]:

$$\begin{aligned} f_{ia} &= 0,18 \cdot 10^{-9} Re_r^{1,35} Re_{de}^{0,93}; \\ f_{ia} &= 0,893 \cdot Re_r^{-0,492} Re_{de}^{0,49}. \end{aligned} \quad (3)$$

Сравнения расчета  $f_{ia}$  по приведенным методикам с экспериментальными данными свидетельствует, что при качественном сходстве численно результаты расчетов значительно отличаются. Это говорит о том, что пользоваться методиками такого типа следует лишь в диапазоне изменения параметров, которые имели место в соответствующих исследованиях, результаты которых эти методики и обобщают. К сожалению, эти диапазоны, как правило, очень узки.

Как видно из анализа результатов, большинство значений приведенного коэффициента гидравлического сопротивления находятся в области с превосходящим влиянием на гидравлическое сопротивление величины шероховатости межфазной поверхности, или, как ее иначе называют, в области квадратичного закона сопротивления. Еще в [5] отмечено, что эффективная песочная шероховатость межфазной поверхности зависит, в первую очередь, от толщины пленки независимо от расходных характеристик фаз.

Для определения приведенного коэффициента гидравлического сопротивления появились методики, которые учитывают отношение толщины пленки к диаметру. Зависимость  $f_{ia}$  от толщины пленки:

$$f_{ia} = f_r [1 + 360 (\bar{\delta}/d)]; [6] \quad (4)$$

$$f_{ia} = f_r [1 + (A^+/f_p^{0,75})] [2 \delta/D (1 - 2 \bar{\delta}/d) - 2 B^+/(f_{ia}/8)^{0,5} Re_r];$$

$$A^+ \approx 20; B^+ = 0,9 \cdot 10^{-2} Re_{de} v_{ж}/v_{ж20}. [7] \quad (5)$$

Применение методик такого типа связано со значительными трудностями. Это вызвано тем, что для определения усредненной толщины пленки  $\bar{\delta}$ , особенно в области умеренной и сильной интенсивности взаимодействия фаз, отсутствует единый достоверный метод. Поэтому следует знать, которым из существующих методов для определения толщины пленки пользовались авторы при получении зависимости между  $f_{ia}$  и  $\delta$ . Соответственно, расчеты по методикам типа (4), (5), как правило, имеют ограниченный характер и связаны с наличием значительной погрешности.

Анализ процесса межфазного взаимодействия и полученных результатов экспериментальных исследований методами теории подобия позволили предложить следующую систему безразмерных чисел подобия для их обобщения:

$$\Delta^*_e = \varphi(\tau^*_i, Re_{de}, We^*). \quad (6)$$

Определяемым параметром избрана безразмерная эквивалентная шероховатость междуфазной поверхности  $\Delta^*_e$ , причем в качестве линейного масштаба избрана постоянная Лапласа, которая традиционно применяется при анализе процесса дробления жидких масс в двухфазном потоке. Поскольку одним из основных факторов, которые определяют характер междуфазного взаимодействия, является разрушение гребней волн, этот выбор является целесообразным. Безразмерное касательное напряжение границы двух фаз  $\tau^*_i$  является мерой соотношения сил междуфазного трения и тяго-

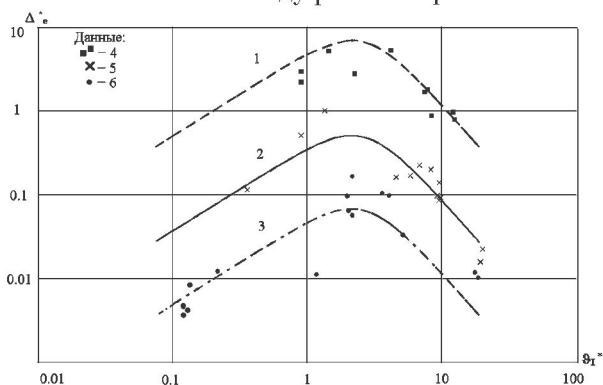


Рис.1. Зависимость  $\Delta^*_e = \varphi(\tau^*_i)$ . Расчет по (7): 1 –  $Re = 950, We = 4500$ ; 2 –  $Re = 600, We = 5500$ ; 3 –  $Re = 300, We = 4500$ . Экспериментальные данные: 4 –  $Re = 800-1100, We = 4000-5000$ ; 5 –  $Re = 500-700, We = 5000-6000$ ; 6 –  $Re = 200-400, We = 4000-5000$ .

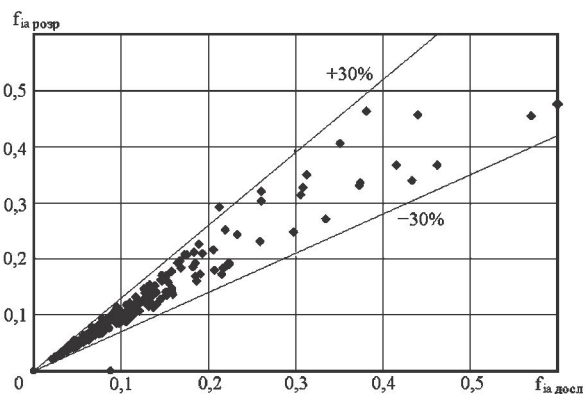


Рис.2. Сравнение расчетных и экспериментальных значений  $f_{ia}$ .

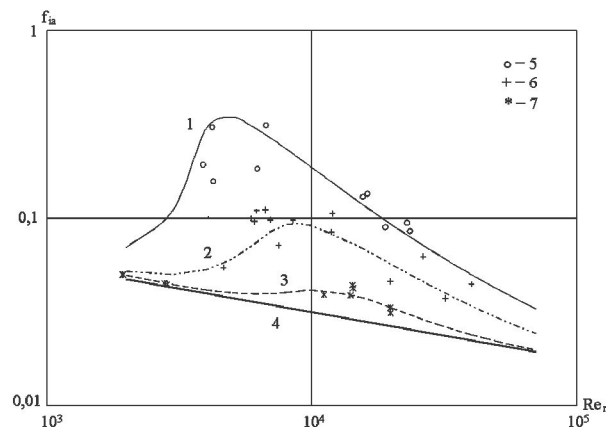


Рис.3. Зависимость  $f_{ia}$  от  $Re_p$ : 1 –  $Re_p = 1000, We = 4500$ ; 2 –  $Re_p = 700, We = 5000$ ; 3 –  $Re_p = 400, We = 5500$ ; 4 –  $f_{ia} = 0,3164/Re^{0,25}$ ; 5 –  $Re = 800-1200, We = 4000-5000$ ; 6 –  $Re = 600-800, We = 4500-5500$ ; 7 –  $Re = 300-500, We = 5000-6000$ .

тения в пленке, а совместно с числом Рейнольдса пленки и модифицированным числом Вебера  $We^*$  определяет гидродинамику пленки, в том числе ее толщину, и процесс волнообразования на поверхности.

Обработка результатов экспериментов в системе (6) позволила получить расчетное уравнение:

$$\Delta^*_e = 7 \cdot 10^3 (\tau^*_i / \tau^*_i^{2,8} + 15) Re_{de}^{4,0} We^{*-3,8}. \quad (7)$$

Сравнение рассчитанных по (7) и полученных при обработке экспериментальных данных значений  $\Delta^*_e$  показано на рис.1. Приведенные материалы говорят об их удовлетворительном соответствии.

Для определения приведенного коэффициента трения на междуфазной поверхности необходимо решить систему из уравнения (7), уравнения Коулбрука-Уайта [8], описывающего критерияльную зависимость  $f_{ia}$  от ряда параметров:

$$f_{ia}^{-0,5} = 1,74 - 0,87 \times \times \ln (2 \Delta_e d^{-1} + 18,6 Re_r^{-1} f_{ia}^{-0,5}), \quad (8)$$

а также уравнений, учитывающих касательное напряжение на межфазной поверхности:

$$\tau_{ia} = f_{ia} \rho_{\Gamma} v_{\Gamma}^2 / 8, \quad (9)$$

$$\tau_i = \tau_{ia} - 0,6 q v_{\Gamma} \Delta h_{fg}. \quad (10)$$

На рис.2, 3 приведено сравнение значений  $f_{ia}$ , рассчитанных по предлагаемой методике, со значениями коэффициента, определенными по результатам экспериментов. Можно констатировать удовлетворительное совпадение результатов расчета экспериментов.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований разработана методика расчета эквивалентной шероховатости поверхности раздела «жидкость — пар» в кольцевом парожидкостном потоке, приведенного коэффициента гидравлического сопротивления парового ядра и касательного напряжения на межфазной поверхности, позволяющая описать результаты экспериментальных исследований во всем диапазоне изменения расходных характеристик фаз.

### Условные обозначения

$f_{ia}$	– приведенный коэффициент гидравлического сопротивления парового ядра
$Re_{\Gamma}$	– число Рейнольдса газового потока, $Re_{\Gamma} = v_{\Gamma} d / \nu_{\Gamma}$
$v_{\Gamma}$	– приведенная к диаметру канала скорость газа, м/с
$d$	– диаметр трубы, м
$Re_{de}$	– число Рейнольдса пленки, $Re_{de} = 4 \Gamma / \nu_{ж}$
$\Gamma$	– объемная плотность орошения пленки, м <sup>2</sup> /с
$\nu_{ж}, \nu_{\Gamma}$	– кинематические коэффициенты вязкости жидкости и газа, м <sup>2</sup> /с
$Re_{\delta}$	– модифицированное число Рейнольдса пленки, $Re_{\delta} = \Gamma / \nu_{ж}$
$Ga_{\sigma}$	– число Галилея пленки, $Ga_{\sigma} = [\sigma / g (\rho_{ж} - \rho_{\Gamma})]^{3/2} \times (\nu_{ж}^2 / g)^{1/3}$
$We$	– число Вебера, $We = v^2 \rho_{\Gamma} d / \sigma_{ж}$
$\rho_{ж}, \rho_{\Gamma}$	– плотность жидкости и газа, кг/м <sup>3</sup>
$\sigma_{ж}$	– коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м
$x$	– продольная координата, м
$\tau_i^*$	– безразмерное касательное напряжение на междуфазной поверхности, $\tau_i^* = \tau_i / [\rho_{ж} g (\nu_{ж}^2 / g)^{1/3}]$
$\tau_i$	– касательное напряжение на междуфазной поверхности, Н/м <sup>2</sup>

$We_*$	– модифицированное число Вебера пленки, $We_* = \sigma_{ж} \rho_{ж} g (\nu_{ж}^2 / g)^{2/3}$
$\Delta_e^*$	– безразмерная эквивалентная шероховатость междуфазной поверхности, $\Delta_e^* = \Delta_e / l_0$
$\Delta_e$	– эквивалентная песочная шероховатость междуфазной поверхности, м
$l_0$	– постоянная Лапласа, $l_0 = \{\sigma / [g(\rho_{ж} - \rho_{\Gamma})]\}^{1/2}$ , м
$q$	– плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>
$\Delta h_{fg}$	– удельная теплота парообразования, Дж/кг

### Список литературы

1. Диденко А.Я., Дубровский Г.П., Леонов В.А. и др. Исследование сопротивления и пристенной области газожидкостного изотермического потока при дисперсно-кольцевом режиме течения // *Вопр. теплофизики ядер. реакторов.* – М. : Атомиздат, 1971. – Вып. 3. – С. 23–31.
2. Чен Ше-Фу, Ибеле. Потери напора и толщина жидкой пленки при кольцевом двухфазном чисто пленочном течении и течении с образованием эмульсии // *Труды Америк. о-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача.* – 1964. – № 1. – С. 116–125.
3. Ганчев Б.Г. Охлаждения элементов ядерных реакторов стекающими пленками. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 192 с.
4. Коновалов Н.М., Харин В.Ф., Николаев Н.А. Расчет гидравлического сопротивления в условиях прямого течения нисходящего движения газа и пленки жидкости // *Теорет. основы хим. технологии.* – 1985. – № 1. – С. 48–52.
5. Gill L.E., Hewitt G. Fond Lacey P.M.C. Satpling probe studies of the gas core in annular two-phase flow : II Studies of the effect of phase flowretes on phase and velocity distribution // *Chem. Eng. Sie.* – 1964. – P. 665–682.
6. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – М. : Мир, 1972. – 440 с.
7. Коновалов Н.М., Войнов Н.А., Николаев Н.А.. Гидродинамические закономерности вертикального прямого течения газа и пленки жидкости в трубах // *Теорет. основы хим. технологии.* – 1993. – № 2. – С. 192–196.
8. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. – М. : Энергия, 1979. – 408 с.

Поступила в редакцию 03.03.08