расчет дает возможность отказаться от использования коэффициента теплоотдачи α, определение которого в период падающей скорости сушки очень сложно. Нахождение эмпирических формул $Rb = f(\bar{u})$ и $B = f(\bar{u})$ представляет большой интерес не только для расчета кинетики процесса сушки, но и для ее технологии.

Литература

1. Лыков А.В. Теория сушки. М., 1968, с. 125. 2. Лыков А.В. и др. Приближенный метод расчета кинетики процесса сушки. - ИФЖ, 1967, 13, № 5, с. 430. 3. Лыков А.А. и др. Приближенный метод расчета температуры материала в процессе сушки. - В сб.: Тепло- и массообмен, 6, № 1, 1968, с. 536. 4. Лыков А.В., Куц П.С., Ольшанский А.И. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов. - ИФЖ, 1972, 23, № 3, с. 231. 5. Куц П.С., Ольшанский А.И. Экспериментальное исследование зависимостей критерия Ребиндера от режимных параметров. - Тр. III конференции по сушке. Будапешт, 1971. 6. Шубин Г.С. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена при высокотемпературной конвективной сушке плоских древесных материалов. - В сб.: Тепло- и массоперенос, вып. 4, 1963, с. 315.

УДК 66.048

В.П.Грибкова, Л.В.Новосельская,
И.М.Плехов, В.А.Марков

ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОДИНАМИКИ КОЛЬЦЕВОГО ДВУХФАЗНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

В число основных гидродинамических параметров, определяющих структуру двухфазного закрученного течения, входят касательные напряжения на стенке кольцевого канала и на границе раздела фаз.

Так как экспериментальное изучение распределения касательных напряжений на границе раздела фаз связано со значительными трудностями, необходимо искать пути приближенного вычисления такого распределения на основании математической модели течения.

Для двухфазного закрученного потока, где газ движется по центральной части поперечного сечения канала, а пленка жидкости под действием касательного напряжения со стороны газа перемещается в виде тонкого кольцевого слоя по стенке контактного элемента, математическая модель гидродинамики описывается дифференциальными уравнениями Навье – Стокса.

Рассмотрим решение их в приближении пограничного слоя[1] с учетом следующих допущений: принимаем течение безволновым; поскольку толщина пленки δ мала по сравнению с радиусом элемента R, задачу рассматриваем на плоской вертикальной поверхности. В таком случае система уравнений осесимметричного движения ламинарной пленки жидкости и турбулентного потока газа примет следующий вид:
для турбулентного потока газа

$$\bar{u}_г \frac{\partial \bar{u}_г}{\partial x} + \bar{v}_г \frac{\partial \bar{u}_г}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_г}\frac{\partial P}{\partial x}\sin\alpha + \frac{\partial}{\partial y}\left[(\nu_м + \nu_т)\right]\frac{\partial \bar{u}_г}{\partial y},$$

$$\frac{\partial(\rho_г \bar{u}_г)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_г \bar{v}_г)}{\partial y} = 0; \qquad (1)$$

для ламинарной пленки жидкости

$$\bar{u}_ж \frac{\partial \bar{u}_ж}{\partial x} + \bar{v}_ж \frac{\partial \bar{u}_ж}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_ж}\frac{\partial P}{\partial x}\sin\alpha + \frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_ж \frac{т\,\partial \bar{u}_ж}{\partial y}\right) g\sin\alpha;$$

$$\frac{\partial(\rho_ж \bar{u}_ж)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_ж \bar{v}_ж)}{\partial v} = 0, \qquad (2)$$

где u, v – осевая и радиальная составляющие скорости; x, y – продольная и поперечная координаты; ρ – плотность, кг/м^3; ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с; ε – коэффициент турбулентного обмена, м^2/ с; μ – коэффициент динамической вязкости, н.с./м^2.

Граничные условия:
прилипания на стенке при $y = 0$

$$\bar{u}_ж = \bar{v}_ж = 0; \qquad (3)$$

на границе раздела фаз при $y = \delta(x)$

$$\bar{u}_ж = \bar{u}_г; \ \bar{u}_ж = \frac{d\delta}{dx} - \bar{v}_ж = 0,$$

$$(\mu_г + \varepsilon_г)\frac{\partial \bar{u}_г}{\partial y} = \mu_ж \cdot \frac{\partial \bar{u}_ж}{\partial y}; \qquad (4)$$

в объеме при $y \to \infty$ $\quad \bar{u}_г = \bar{u}_{г\infty} = \mathrm{const}.$

Толщина пленки определяется из условия постоянства расхода в каждом сечении:

$$G_ж = \rho_ж \int_0^{\delta} \bar{u}_ж \, dy. \tag{5}$$

На основании эксперимента [2] значения коэффициента турбулентной вязкости считались по формуле $\nu = 6 \cdot 10^{-3} u_\infty Re$. Система уравнений в частных производных (1) - (2) вырождается в начале координат, поэтому получить ее решение способами, существующими для задач в частных производных, не представляется возможным. В связи с этим для исходной системы уравнений с помощью подобного преобразования был осуществлен переход к системе уравнений в обыкновенных производных. В качестве безразмерной координаты выбрана переменная $\eta = \frac{y}{\sqrt{x}} \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu}}$.

Исходные уравнения (1) - (2) и краевые условия (3) - (4) преобразуются с помощью новой переменной. Уравнения движения и неразрывности сводятся к уравнению для функции тока третьего порядка:

для газа $$F''' + \frac{1}{2} F F'' - \frac{xg}{u_\infty^2 \rho} \sin\alpha \frac{dP}{dx} = 0; \tag{6}$$

для жидкости $$f''' + \frac{1}{2} f f'' + \frac{xg}{u_\infty^2 \rho} \left(\frac{dP}{dx} + g \right) \sin\alpha = 0. \tag{7}$$

Краевые условия при этом приводятся к виду:
на стенке

при $y = 0$ $f'(0) = 0$ и $f(0) = 0$;

на границе раздела фаз

при $y = \delta(x)$ $f'(\eta_\delta) = F'(0)$ и $f''(\eta_\delta) = F''(0) \frac{\mu_г + \varepsilon_г}{\mu_ж} \sqrt{\frac{\nu_ж}{\nu_г}}$; (8)

в объеме

при $y \to \infty$, $F'(\infty) = 1$.

Безразмерная координата $\eta_ж = y\sqrt{\frac{u_ж}{\nu_ж x}}$ изменяется в жидкости в пределах $0 \le \eta_ж \le \eta_\delta$; в газе $0 \le \eta < \infty$.
Преобразование уравнения (5) приводит к равенству

$$G_ж = \rho_ж \sqrt{u_\infty \nu_ж x}\ f(\eta_\delta). \tag{9}$$

Решение уравнений гидродинамики не является автомодельным, так как толщину пленки определяют уравнения (7) и (9), в которые в качестве параметра входит величина x. Расчеты с помощью разложения в бесконечный ряд показали, что при значениях безразмерной толщины пленки $\eta_\delta \le 3$ в уравнении (7) можно пренебречь конвективным членом и членом, учитывающим силу тяжести. При этом наибольшая ошибка при определения профиля скоростей в жидкости не превышает 2–3%. При определении толщины пленки ошибка составляет десятые доли процента. Поэтому безразмерное уравнение гидродинамики в жидкости принимает вид

$$f''(\eta) = 0. \tag{10}$$

Решением его с учетом краевых условий (8) являются функции:

$$f''(\eta) = D;\ f'(\eta) = D\eta\ ;\ f(\eta) = D\,\frac{\eta^2}{2}. \tag{11}$$

Константа D зависит от координаты x, и ее вычисление производится методом "пристрела" таким образом, чтобы система дифференциальных уравнений (6) и (7) удовлетворяла условию на бесконечности (8). Тогда получим уравнения профилей скорости в жидкости:

$$u = u_\infty D\eta;\ v = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{u_ж u_\infty}{x}}\, D\,\frac{\eta^2}{2}.$$

Учитывая, что $u_ж \frac{d\delta}{dx} - v_ж = 0$ на границе раздела фаз, можно выразить производную

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{v(\delta)}{u(\delta)} = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{\nu_ж}{x u_\infty}} \cdot \eta_\delta\ . \tag{12}$$

Условие (5) дает возможность определить

$$\eta_\delta = \sqrt{\frac{2G_ж}{D\rho_ж\sqrt{u_ж \nu_ж}}}. \qquad (13)$$

Подстановка (12) и (13) в интегрирование приводит к выражению безразмерной толщины пленки

$$\eta_\delta = x^{1/4}\sqrt{\frac{2G}{D\rho_ж\sqrt{u_\infty \nu_ж}}};$$

толщины пленки

$$\delta = x^{1/4}\sqrt{\frac{2G_ж}{D\rho_ж}\sqrt{\frac{\nu_ж}{u_\infty^3}}};$$

профиля общей скорости в жидкости

$$u_ж = u_\infty D y\sqrt{\frac{u_\infty}{\nu_ж x}};$$

тангенциального напряжения на границе раздела фаз

$$\tau_\delta = D u_\infty^{3/2}\sqrt{\frac{\mu_ж \rho_ж}{g x}}.$$

Как видно из решения (10), тангенциальное напряжение на границе раздела фаз с точностью, достаточной для инженерных расчетов, равно тангенциальному напряжению на стенке τ_0. Более точные расчеты с учетом силы тяжести показали, что тангенциальное напряжение τ_δ превосходит τ_0 не более чем на 3 - 4%.

Разложение в ряд Тейлора решения уравнения (7) с учетом конвективных членов и силы тяжести подтвердило, что погрешность в рассматриваемом диапазоне параметров не превосходит указанных ранее пределов погрешности.

Выводы. Данный метод расчета позволил оценить величину основных гидродинамических параметров кольцевого двухфазного закрученного потока, экспериментальное определение которых черезвычайно сложно. Метод может быть использован при расчете прямоточных контактных устройств в массообменных аппаратах.

Литература

1. Крылов В.С., Воротилин В.П., Левич В.Г. К теории волнового движения тонких пленок жидкости. - ТОХТ, 1969, 3, № 4, с. 499. 2. Гостинцев Ю.А., Зайцев В.М. О кинематическом подобии турбулентного закрученного потока в трубе. - ИФЖ, 1971, 20, № 3, с. 434.

УДК 666. 189.3

В.И.Пилецкий

РОЛЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕНОСТЕКЛА

Основная проблема, возникающая при производстве пеностекла, как указывал автор технологии И.И.Китайгородский, состоит в том, чтобы "равномерно пронизать стекломассу газовыми или воздушными пузырями и получить, таким образом, стекло малого объемного веса и с высокими теплоизоляционными свойствами". С этой целью порошок стекла тщательно перемешивают с газообразователем во время совместного помола и получаемую смесь подвергают термообработке. При повышении температуры частицы стекла спекаются и образуют микрополости, в которых замкнут газообразователь. В ходе последующей термообработки осуществляется формирование структуры пеностекла и отжиг полученных изделий.

Исследования, выполненные С.П.Каменецким [1], показывают, что образование ячеистой структуры при вспенивании силикатных материалов обусловлено взаимодействием двух основных факторов: пиропластическим состоянием материала и образованием газов, вызывающих вспенивание. Кроме того, важнейшие свойства пеностекла обусловлены степенью дисперсности пенообразующей смеси, а также условиями возникновения и развития ячеистой структуры в период термической обработки [2].

Пенообразующая смесь на протяжении периода вспенивания представляет собой гетерогенную систему, в которой обычно присутствуют три фазы: твердая - газообразователь, жидкая - расплав и газообразная - воздух и газы, вызванные присутствием газообразователя. На формирование ячеистой структуры пеностекла в наибольшей степени оказывают влияние свойства компонентов, представляющих эти фазы. В первую очередь это относится к расплаву, который в зависимости от ряда факто-