УДК 532.529:66.011

В.М.Собин

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАРБОТАЖНО-ПРЯМОТОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

Барботажно-прямоточное контактное устройство [1] состоит из ситчатой тарелки и центробежного узла сепарации жидкости, соединенных между собой сужающимся конусом. На ситчатую тарелку по трубке подается орошающая жидкость. Благодаря такому конструктивному оформлению в устройстве удается существенно увеличить скорость газа и жидкости и интенсифицировать процессы тепло- и массообмена. При этом в устройстве реализуется сложный характер взаимодействия фаз, что затрудняет возможности аналитического расчета гидродинамических параметров.

Отмечая трудности расчета гидродинамических параметров двухфазных потоков вообще, следует отметить дополнительные трудности, вызванные тем обстоятельством, что формирование двухфазного течения происходит непосредственно в контактном устройстве.

Основываясь на визуальных наблюдениях, в [1] сделано заключение о гомогенном течении в устройстве. Поэтому первоначально проанализирована возможность расчета гидродинамических параметров по гомогенной модели течения.

Основные уравнения гомогенного течения имеют следующий вид [2] :

уравнение неразрывности

$$G = \rho_{см} u_{см} S = const; \tag{1}$$

уравнение движения

$$G \frac{du_{см}}{dz} = - S \frac{dp}{dz} - S\rho_{см} g - A\tau . \tag{2}$$

В уравнениях (1) и (2) $u_{см}$ и $\rho_{см}$ - соответственно скорость смеси и плотность; S и A - площадь сечения и периметр канала; τ - касательное напряжение на стенке канала; z - координата, направленная по оси канала в сторону движения смеси.

Плотность смеси выражается по следующему уравнению через объемное газосодержание:

$$\rho_{см} = \alpha \rho_г + (1-\alpha)\rho_ж, \qquad (3)$$

где $\rho_г$ и $\rho_ж$ – соответственно плотности газа и жидкости. Объемное газосодержание для гомогенного потока определяется соотношением

$$\alpha = \frac{Q_г}{Q_г + Q_ж}, \qquad (4)$$

$Q_г$ и $Q_ж$ – объемный расход газа и жидкости.

Разрешая уравнение (2) относительно градиента давления, найдем

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{A}{S}\tau - \frac{G}{S}\cdot\frac{du_{см}}{dz} - \rho_{см} g. \qquad (5)$$

Три члена в правой части представляют собой составляющие градиента давления от трения, ускорения и силы тяжести. Выразим подробнее первые два слагаемых в правой части (5). Для касательного напряжения на стенке воспользуемся зависимостью

$$\tau = c_f \frac{1}{2}\rho_{см} u^2_{см}. \qquad (6)$$

Для составляющей градиента давления от трения имеем

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{тр} = \frac{1}{2}\frac{A}{S} c_f \rho_{см} u^2_{см}. \qquad (7)$$

Подставив $u_{см}$ из (1) и выразив периметр канала через его площадь, из (7) находим

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{тр} = \sqrt{\pi}\, c_f \frac{G^2}{\rho_{см}} \frac{1}{S^{2,5}}. \qquad (8)$$

Для второго слагаемого в (5) имеем

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{уск} = \frac{G}{S}\frac{du_{см}}{dz} = \frac{G}{S}\frac{d}{dz}\left(\frac{G}{S\rho_{см}}\right) =$$

$$= \frac{G^2}{\rho_{см}} \frac{1}{S^3} \frac{dS}{dz}. \qquad (9)$$

В уравнении (9) $\rho_{см}$ принята независящей от z.

Чтобы проинтегрировать (8) и (9), необходимо задать S как функцию z. Для исследованного контактного устройства [1] с диаметром ситчатой тарелки 0,23 м, диаметром в узком сечении 0,095 м и высотой устройства 0,2 м получим

$$S = 0{,}0415 - 0{,}172\, z\,. \qquad (10)$$

Учитывая (10), из (8) и (9) после интегрирования имеем

$$-\Delta p_{тр} = 6 \cdot 10^3 \sqrt{\pi}\, c_f\, \frac{G^2}{\rho_{см}}\,, \qquad (11)$$

$$-\Delta p_{уск} = 9{,}64 \cdot 10^3\, \frac{G^2}{\rho_{см}}\,, \qquad (12)$$

а из (5) для потерь давления от силы тяжести

$$-\Delta p_g = 0{,}2 \rho_{см} g. \qquad (13)$$

В [2] показано, что коэффициент трения при гомогенном течении с хорошим приближением может быть принят постоянным и равным $c_f = 0{,}005$. Подставляя это значение c_f в (11), легко заключить, что потери давления от трения можно не учитывать. Поскольку объемный расход газа в опытах [1] превосходил расход жидкости в 8 – 64 раза, потери давления двухфазного потока в сепарационной решетке незначительно превышают потери однофазного потока.

Кроме рассмотренных составляющих потерь давления, в данном случае должны быть включены потери давления от местных сопротивлений, которые частично учитываются в потерях давления сухого устройства $\Delta p_{сух}$. Если при расчете потерь давления орошаемого устройства $\Delta p_{ор}$ исходить из $\Delta p_{сух}$, то из суммарных потерь давления $\Delta p_{ор}$ необходимо исключить потери на ускорение газовой фазы. При этом учитываются потери давления на ускорение только жидкой фазы. Тогда вместо соотношения (12) надо записать

$$\Delta p_{уск.ж} = \frac{1}{2}\, \rho_ж (1-\alpha)\, u^2_{см.к}\,, \qquad (14)$$

в котором $u_{см.к}$ – скорость смеси в узком сечении устройства.

С учетом сказанного суммарные потери в двухфазном потоке определим по зависимости

$$\Delta p_{op} = \Delta p_{сух} + \Delta p_{d} + \Delta p_{уск.ж} \qquad (15)$$

с составляющими потерь давления, определяемыми по (13) и (14). В (15) в первом приближении не учитываются также особенности гидродинамики двухфазного потока для различных ситчатых тарелок контактных устройств.

Проведена серия расчетов с использованием (15). В результате установлено, что методика расчетов по гомогенной модели позволяет правильно оценить гидродинамические параметры до 10 м/с по газу в узком сечении устройства. При больших скоростях газа расчетные и опытные данные существенно различаются. Основной причиной расхождения данных являются завышенные значения объемных газосодержаний, т.е. при больших расходах газа скорости жидкости и газа значительно отличаются. Тем самым модель гомогенного течения становится несостоятельной и необходима ее модификация.

Модель гомогенного течения модифицирована с помощью плотности потока дрейфа [2]

$$u_{21} = \alpha\,(u_2 - u_{см}), \qquad (16)$$

где u_2 – истинная скорость движения газовой фазы. Осредняя по сечению канала (16) и учитывая, что при больших объемных расходах u_{21} мало, можно найти

$$\alpha = \frac{1}{C_o}\,\frac{Q_г}{Q_г + Q_ж}, \qquad (17)$$

где C_o – параметр распределения [3], равный отношению среднего значения произведения скорости смеси на объемное газосодержание к произведению средних значений этих величин.

Если учесть, что почти во всем диапазоне скоростей газа течение, по-видимому, близко к пенисто-турбулентному пузырьковому течению [4], можно принять $C_o = 1{,}2$. Вводя это значение в (17), имеем

$$\alpha = 0{,}833\,\frac{Q_г}{Q_г + Q_ж}. \qquad (18)$$

Расчеты, проведенные по зависимости (15) с α, определяемым по (16), показали, что во всем исследованном диапазоне скоростей газа в узком сечении устройства $3 \div 25$ м/с, орошений $0,833 \cdot 10^{-3} \div 0,278 \cdot 10^{-2}$ м^3/с и диаметров отверстий в ситчатых тарелках $(3 \div 6) \times 10^{-3}$м максимальные отклонения расчетных и опытных данных не превосходят $\pm$ 25%. Такое совпадение данных для двухфазных потоков следует признать хорошим.

Литература

1. Карпович А.И. Разработка, исследование и практическое применение барботажно-прямоточных контактных устройств. Канд. дис. - Минск, 1975. 2. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. - М., 1972. 3. Зубер, Финдлей. Труды америк. общ. инж.-мех. Сер. Теплопередача, 1965, №4, с.29. 4. Zuber H., Hench J. - Rept. N 62 GL 100, General Electric Co., Schenectady, N. Y., 1962.