

УДК 663.14.033

Теплообмен между стенкой вертикальной трубы и газожидкостной смесью в условиях перемешивания среды жидкими струями

Н.А. ПЕТРОВ, канд. техн. наук А.Б.ДУЖИЙ, д-р техн. наук, проф., академик МАХ В.Б. ТИШИН
Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

Results of experimental investigations and calculations are presented which show, that the use of adopted hydrodynamic model of movement of gas-liquid mixture under the conditions of spray turbulization of medium is quite justified.

Теплообмен в трубах кожухотрубного струйно-инжекционного абсорбера (КСИА), применяемого для насыщения напитков диоксидом углерода, аэробного культивирования микроорганизмов, окислительной полимеризации растительных масел [5, 6], протекает в сложных гидродинамических условиях. На рис. 1 показана схема одноходового КСИА, в котором образование нисходящего газожидкостного потока происходит в трубах 1 в результате инъекции газа свободной жидкой струей 2 в газожидкостную смесь.

Решение задачи теплообмена между теплопередающей поверхностью и газожидкостным потоком в условиях, когда источником турбулизации служат стенки и относительное движение фаз, можно найти в работе [4].

Коэффициент теплоотдачи α находили из уравнения

$$\alpha = \frac{\rho_{\text{ж}} g c_p u_*}{\Psi} \quad (1)$$

Входящую в уравнение (1) среднюю безразмерную разность между температурами поверхности стенки и газожидкостной смеси Ψ определяли на основе полуэмпирической теории турбулентности и аналогии меж-

ду переносом импульса и теплоты [4].

В рассматриваемом нами случае к двум указанным выше источникам турбулизации добавляется третий – взаимодействие струи с газожидкостной смесью. Основная сложность заключается в определении динамической скорости u_* .

Известно [4], что динамическая скорость пропорциональна средней по объему среды диссипации энергии, т.е.

$$u_* \sim \left(\frac{E \nu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где $\nu_{\text{ж}}$ – коэффициент кинематической вязкости;
 $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости.

В поисках закономерности переноса теплоты в условиях струйного перемешивания газожидкостной смеси будем исходить из того, что имеются три источника турбулизации: стенка трубы, относительное движение фаз и возмущающее действие струи. Последний фактор связан с торможением струи и, как следствие этого, с ее расширением (рис. 2). С учетом трех источников турбулизации значение E в пропорциональности (2)

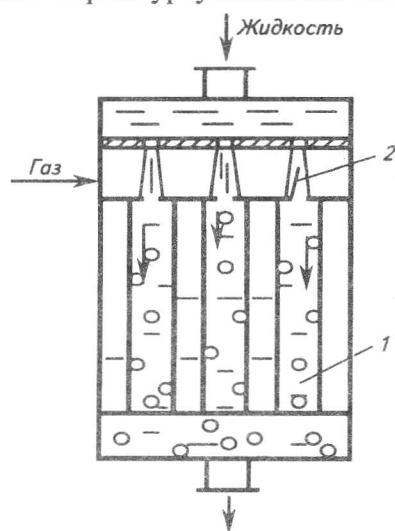


Рис. 1. Схема одноходового КСИА

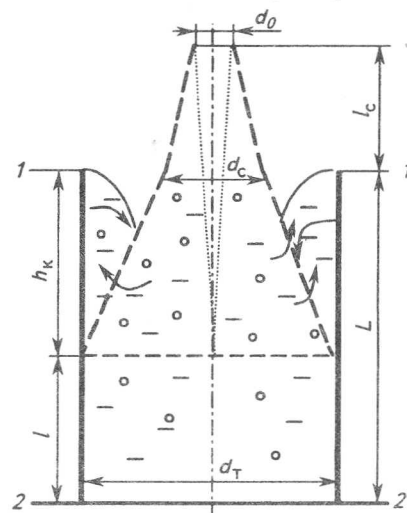


Рис. 2. Схема движения струи на различных участках трубы

представим в виде суммы

$$E = E_1' + E_2 + E_3. \quad (3)$$

Сумма первых двух слагаемых согласно [4] равна

$$E_1 + E_2 = \frac{\tau_{гж}^2}{\mu_{ж}} + \chi_1^4 \rho_{ж} g v_{от} \varphi_r (1 - \varphi_r)^2. \quad (4)$$

В уравнении (4) касательные напряжения на стенке при движении газожидкостной смеси согласно данным [4]

$$\tau_{гж} = \frac{\tau_{ж}}{(1 - \varphi_r)^{1,75}}, \quad (5)$$

где $\tau_{ж}$ – касательные напряжения на стенке при течении однофазного потока рассчитываются по известным в гидравлике формулам по приведенной скорости жидкости $v_{ж}$.

Так как нами рассматривается нисходящее течение, то согласно имеющимся в литературе данным φ_r равно расходуемому газосодержанию β_r , но в этом случае относительная скорость фаз $v_{от} = 0$ [3] и второе слагаемое в уравнении (3) исчезает. Таким образом, в конечном итоге задача сводится к определению величины E_3 . Данную задачу будем решать так же, как и при определении E_2 в уравнении (4), исходя из равенства

$$E_3 = \chi_2^4 \frac{N_p}{V_{ж}}. \quad (6)$$

Определим энергию, расходуемую в единицу времени на расширение струи от диаметра d_c до d_T после входа ее в газожидкостную смесь (рис.2):

$$N_p = \Delta p_p Q_{ж},$$

а также объем жидкости в трубе, возмущенный струей:

$$V_{ж} = V_T / (1 - \varphi_r).$$

Подставив значения N_p и $V_{ж}$ в равенство (6) и учитывая поправку на $(1 - \varphi_r)^2$ [4], получим

$$E_3 = \chi_2^4 \frac{\Delta p_p v_{жт} (1 - \varphi_r)^2}{L}, \quad (7)$$

где $v_{жт}$ – приведенная скорость жидкости в трубе;

L – длина возмущенной части газожидкостного потока.

После подстановки значения E_3 из равенства (7) и $\tau_{гж}$ из (4) в пропорциональность (2) получим

$$u_* = \left(\frac{\tau_{гж}^2}{\rho_{ж}^2} + \chi_2^4 \frac{v_{ж} \Delta p_p v_{жт} (1 - \varphi_r)^2}{\rho_{ж} L} \right). \quad (8)$$

Визуально установлено, что возмущение струи распространяется по течению газожидкостного потока на расстояние $L = (1...1,5)h_k$, где h_k – глубина проникновения струи в среду, рассчитывается по уравнению [5]:

$$h_k = \left(\frac{3,44 d_0 v_0^3}{g^{1,5}} \right). \quad (9)$$

В уравнении (8) осталась одна неизвестная величина Δp_p – потери давления на участках трубы 1 – 1 и 2 – 2 (см. рис. 2). Попытка решения этой задачи была сделана в работе [7]. Однако при выводе расчетного уравнения было принято условие $d_c = d_0$, что противоречит последним исследованиям А.Б. Дужего, выполнившего зондирование струи электрометрическим методом в поперечном и продольном направлениях [1]. Было установлено, что структура струи неоднородна. Она состоит из сплошной центральной части диаметром $d_{ц}$, уменьшающейся по длине; газожидкостного слоя диаметром d_c , увеличивающегося по длине струи, и пограничного газового слоя.

Определим Δp_p по той же методике, что и гидравлические потери при внезапном расширении потока. С этой целью составим баланс энергии газожидкостного потока для сечений 1 – 1 и 2 – 2 с учетом неоднородности структуры струи

$$\begin{aligned} p_1 + \frac{\rho_{ж} v_{ц}^2}{2} + \frac{\rho_{ж} u_{ж1}^2}{2} + \frac{\rho_r u_{r1}^2}{2} = \\ = p_2 + \frac{\rho_{ж} u_{ж2}^2}{2} + \frac{\rho_r u_{r2}^2}{2} + \Delta p_p, \end{aligned} \quad (10)$$

где $v_{ц}$ – средняя скорость жидкости в центральной зоне струи;

$u_{ж1}$ и u_{r1} – истинные скорости жидкости и газа в газожидкостном слое струи;

$u_{ж2}$ и u_{r2} – истинные скорости фаз в трубе.

Так как $\rho_{ж} \gg \rho_r$, то кинетической энергией газа пренебрегаем. С учетом того, что $u = v/(1 - \varphi_r)$, в уравнении (10) истинные скорости заменим на приведенные и найдем значение Δp_p :

$$\begin{aligned} \Delta p_p = \frac{\rho_{ж} v_{ц}^2}{2} + \frac{\rho_{ж} v_{ж1}^2}{1(1 - \varphi_{r1})^2} - \\ - \frac{\rho_{ж} v_{ж2}^2}{2(1 - \varphi_{r1})^2} + (p_1 - p_2). \end{aligned} \quad (11)$$

Разность давлений $p_1 - p_2$ определим, воспользовавшись теоремой об изменении количества движения ΔK массы жидкости, находящейся между сечениями 1 – 1 и 2 – 2, согласно которой

$$\begin{aligned} \frac{\Delta K}{\Delta t} = \frac{\Delta m_T u_{жт}}{\Delta t} - \frac{\Delta m_{ц} v_{ц}}{\Delta t} - \\ - \frac{\Delta m_{ж1} u_{ж}}{\Delta t} = (p_1 - p_2) S_T, \end{aligned} \quad (12)$$

где Δm_1 , Δm_T , $\Delta m_{ц}$ – изменение массы жидкости за время Δt в соответствующих зонах. Равенство (12) преоб-

разуем с учетом того, что $\Delta m/\Delta t$ есть массовый расход.

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho_{\text{ж}} v_{\text{жг}}^2}{(1 - \varphi_{\text{г}})} - \rho_{\text{ж}} v_{\text{ц}}^2 \frac{S_{\text{ц}}}{S_2} - \frac{\rho_{\text{ж}} v_{\text{ж1}}^2}{(1 - \varphi_{\text{г}})} \frac{S_1}{S_2}. \quad (13)$$

После подстановки уравнения (13) в (11) получим

$$\Delta p_{\text{р}} = \frac{\rho_{\text{ж}}}{2} \left\{ \frac{v_{\text{жг}}^2}{(1 - \varphi_{\text{г}})^2} (1 - 2\varphi_{\text{г}}) + \frac{v_{\text{ж1}}^2}{(1 - \varphi_{\text{г1}})^2} \left[1 - 2(1 - \varphi_{\text{г1}}) \frac{S_1}{S_{\text{Т}}} \right] + v_{\text{ц}}^2 \left(1 - 2 \frac{S_{\text{ц}}}{S_{\text{Т}}} \right) \right\}, \quad (14)$$

где $S_1 = S_{\text{с}} - S_{\text{ц}}$ – площадь сечения газожидкостного слоя;

$$S_{\text{с}} = 0,785 d_{\text{с}}^2, \quad S_{\text{ц}} = 0,785 d_{\text{ц}}^2;$$

$v_{\text{ж1}} = Q_{\text{ж1}} / S_1$ – приведенная скорость жидкости в газожидкостном слое.

В уравнении (14) истинные газосодержание в трубе $\varphi_{\text{г}}$ и газожидкостном слое струи $\varphi_{\text{г1}}$ рассчитывают по формулам

$$\varphi_{\text{г}} = Q_{\text{г}} / (Q_{\text{г}} + Q_{\text{ж}}); \quad \varphi_{\text{г1}} = Q_{\text{г1}} / (Q_{\text{г1}} + Q_{\text{ж1}}),$$

где $Q_{\text{г1}} = Q_{\text{г}} - Q_{\delta}$; $Q_{\text{ж1}} = Q_{\text{ж}} - Q_{\text{ц}}$; $Q_{\text{г}} = Q_{\text{ц}} + Q_{\text{гж}} + Q_{\delta} - Q_{\text{ж}}$.

Формулы для расчета $Q_{\text{ц}}$, $Q_{\text{гж}}$ и Q_{δ} можно найти в работе [2].

Значения $d_{\text{ц}}$ и $d_{\text{с}}$ рассчитываем по следующим уравнениям:

$$d_{\text{ц}} = d_0 - 3,12 \cdot 10^{-4} l_{\text{с}} \text{We}^{0,5} (1 - 1,42 \cdot 10^{-2} \text{We}^{0,5}); \quad (15)$$

$$d_{\text{с}} = d_0 + 2,14 \cdot 10^{-2} l_{\text{с}} (3,02 \cdot 10^{-2} \text{We}^{0,5} - 1). \quad (16)$$

Уравнения (15) и (16) ограничены значением числа Вебера

$$\text{We} = \frac{\rho_{\text{ж}} d_0 v_0^2}{\sigma} \leq 1100,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения;

v_0 – скорость истечения жидкости из насадки.

При $\text{We} < 1100$ значение $d_{\text{с}}$ можно найти из уравнения

$$d_{\text{с}} = d_{\text{ц}} + 0,54 \cdot 10^{-4} l_{\text{с}} \text{We}^{0,8}. \quad (17)$$

Коэффициент χ_2 , входящий в уравнение (8), определяли экспериментально. Исследования проводили на трехтрубной модели КСИА [6], изготовленной из нержавеющей стали. Значения χ_2 изменялись в пределах от 1,2 до 2. Такой значительный разброс можно объяснить невысокой точностью эксперимента, так как коэффициент теплоотдачи α в уравнении (1) определяли по коэффициенту теплопередачи от пара к воде. Од-

нако в первом приближении χ_2 можно принять равным 1,5, что близко к значению $\chi_1 = 1,9 \dots 2$ в других аппаратах.

Результаты экспериментальных исследований и расчеты, выполненные по уравнениям (1), (8) и (14), показывают, что использование принятой гидродинамической модели движения газожидкостной смеси в условиях струйной турбулизации среды вполне оправдано. Более точное нахождение χ_2 требует и более точной методики проведения эксперимента по определению коэффициента теплоотдачи.

Список литературы

1. Дужий А.Б., Тишин В.Б. Объяснение механизма уноса газа свободной жидкой струей на основе экспериментального исследования ее структуры // Известия СПбГУНиПТ. 2000. № 1.
2. Дужий А.Б., Лебедева Т.Я., Петров Н.А., Михайлов Д.Ю. Зависимость инжектирующей способности жидких свободных струй от физических свойств жидкости // Сб. трудов II МНТК, посвященной 300-летию СПб. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003.
3. Кутателадзе С.С., Старикович Н.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976.
4. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976.
5. Тишин В.Б., Новоселов А.Г., Меледина Т.В. Пути повышения выхода клеточной массы при выращивании *Sacharomyces cerevisiae* Hansen, 1883 в ферментере струйно-инжекционного типа // Микология и фитопатология. 1994. Т.28. № 3.
6. Федоров К.М., Тишин В.Б., Сабуров А.Г. Окислительная полимеризация растительных масел в кожухотрубном струйно-инжекционном аппарате // Масложировая промышленность. 1996. № 5, 6.
7. Хандобин А.В., Новоселов А.Г., Тишин В.Б. Гидродинамика и теплообмен в трубах струйно-инжекционных абсорберов // Межвуз. сб. науч. тр. «Проблемы процессов и оборудования пищевой технологии». – СПб.: СПбГУНиПТ, 2000.
8. Яблокова М.А., Соколов В.Н., Сугак А.В. Гидродинамика и массоперенос при струйном аэрировании жидкостей // Теоретические основы химической технологии, 1988. Т.22. № 6.