

**ГИДРОДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ АППАРАТЕ СО СТРУЙНО-ИНЖЕКЦИОННЫМ ГАЗОНАПОЛНЕНИЕМ**

Разработка малогабаритных, высокоинтенсивных аппаратов для проведения газожидкостных процессов в пищевой, микробиологической промышленности, а также при очистке воды является актуальной задачей. На сегодняшний момент данные задачи эффективно решены при использовании струйно-инжекционных аппаратов [1–3]. При разработке новых конструкций струйно-инжекционных аппаратов особое внимание уделяется гидродинамике структуры потоков в аппарате, изучение которой позволит определить оптимальные режимы смешения для получения максимальной производительности по целевому компоненту.

Одним из решений поставленной задачи является конструкция циркуляционного аппарата со струйно-инжекционным газонаполнением [4]. В данном аппарате струйно-инжекционный эффект используется для газонаполнения реакционного пространства за счет энергии жидкости. В отличие от известных конструкций [1–3], в предложенном аппарате циркуляция жидкости осуществляется за счет перемешивающего устройства, которое выполняет функции осевого насоса. Данное конструктивное исполнение аппарата позволяет обеспечить высокую кратность циркуляции по жидкой фазе.

Для определения оптимальных режимов работы аппарата использовался метод математического моделирования гидродинамики структуры потоков жидкости. Данный метод широко используется в химической технологии [5–9], позволяет за счет импульсного ввода трассера (дельта-функции,  $\delta(t)$ ) определить дисперсию среднего времени пребывания компонентов в аппарате в зависимости от различных режимов работы.

Рассмотрим структурную схему аппарата (рис. 1). Принимаем, что аппарат включает две диффузионные зоны, которые характеризуются передаточными функциями  $W_a(p)$  и  $W_c(p)$ , и зону идеального смешения  $W_b(p)$ . Каждая зона имеет входной и выходной сигнал соответственно:  $X_a(p)$ ,  $Y_a(p)$  – для зоны  $W_a(p)$ ;  $X_b(p)$ ,  $Y_b(p)$  – для зоны  $W_b(p)$ ;  $X_c(p)$ ,  $Y_c(p)$  – для зоны  $W_c(p)$ ;  $X(p)$ ,  $Y(p)$  – в целом по аппарату.

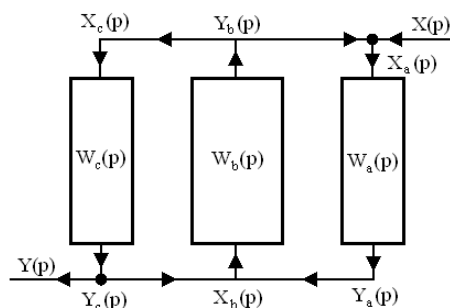


Рисунок 1 – Структурная схема аппарата в операторном виде

Для представленной схемы справедливы следующие зависимости [8]:

$$\left. \begin{aligned} X_a(p) &= Y_b(p) + X(p); X_b(p) = Y_a(p) + Y_c(p); X_c(p) = Y_b(p); Y(p) = Y_c(p); \\ W_a(p) &= Y_a(p)/X_a(p); W_b(p) = Y_b(p)/X_b(p); W_c(p) = Y_c(p)/X_c(p). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Общая передаточная функция по объекту выражается как

$$W(p) = Y(p)/X(p). \quad (2)$$

Из (1) и (2) получим выражение передаточной функции аппарата:

$$W(p) = \frac{W_a(p) \cdot W_b(p) \cdot W_c(p)}{1 - W_b(p) \cdot [W_a(p) + W_c(p)]}. \quad (3)$$

Из зависимости (3) видно, что аппарат включает три последовательно соединенных зоны с обратной связью между центральной зоной и параллельно соединенными боковыми зонами, которые в нашем случае являются реакционными трубами с предположительно диффузионной структурой потока.

Входящий и выходящий потоки в аппарате [8]:  $I_{\text{ВХ}} = v \cdot c_{\text{ВХ}}$ ,  $I_{\text{ВЫХ}} = v \cdot c_{\text{ВЫХ}}$ . Для зоны А с объемом  $V_a$  и передаточной функцией  $W_a(p)$ :  $I_{a,\text{ВХ}} = (v+q) \cdot c_{a,\text{ВХ}} = v \cdot c_{\text{ВХ}} + q \cdot c_{b,\text{ВЫХ}}$ ,  $I_{a,\text{ВЫХ}} = (v+q) \cdot c_{a,\text{ВЫХ}}$ . Для зоны В с объемом  $V_b$  и передаточной функцией  $W_b(p)$ :  $I_{b,\text{ВХ}} = 2 \cdot q \cdot c_{b,\text{ВХ}} = (q-v) \cdot c_{\text{ВХ}} + (q+v) \cdot c_{a,\text{ВЫХ}}$ ;  $I_{b,\text{ВЫХ}} = 2 \cdot q \cdot c_{b,\text{ВЫХ}}$ . Для зоны С, с объемом  $V_c$  и передаточной функцией  $W_c(p)$ :  $I_{c,\text{ВХ}} = q \cdot c_{c,\text{ВХ}} = q \cdot c_{b,\text{ВЫХ}}$ ,  $I_{c,\text{ВЫХ}} = q \cdot c_{c,\text{ВЫХ}}$ . Где  $v$  – объемный расход на входе в аппарат,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $2 \cdot q$  – циркуляционный расход, обеспеченный перемешивающим устройством,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

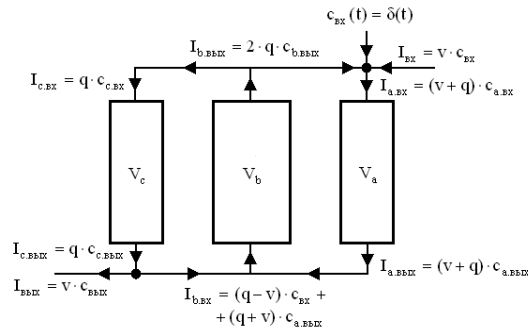


Рисунок 2 – Структурная схема реального объекта

После составления системы уравнения (1) для реального объекта (рис. 2) и решения относительно  $c_{\text{ВХ}}$  и  $c_{\text{ВЫХ}}$ , получим передаточную функцию аппарата:

$$W(p) = \frac{W_a(p) \cdot W_b(p) \cdot W_c(p) \cdot [(q-v) \cdot v]}{[(4 \cdot q \cdot v)/(q-v)] - W_b(p) \cdot W_a(p) \cdot [2 \cdot q \cdot v] - W_b(p) \cdot W_c(p) \cdot [(q-v) \cdot (q+v)]}. \quad (4)$$

Передаточная функция для зоны идеального смешения [9]

$$W_b(p) = [(V_b/2q) \cdot p + 1]^{-1}. \quad (5)$$

Передаточные функции для диффузионных зон  $W_a(p)$  и  $W_c(p)$  получены с граничными условиями по Данквертсу [8]

$$W_{a,c}(p) = 4ae^{\beta} \left[ (a+1)^2 e^{\alpha} - (a-1)^2 e^{-\alpha} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где, соответственно

$$\alpha = \sqrt{\frac{Pe_{a,c}^2}{4} + Pe_{a,c}p}, \quad \beta = \frac{Pe_{a,c}}{2}, \quad a = \frac{\alpha}{\beta}. \quad (7)$$

После подстановки (5)–(7) в (4) получили передаточную функцию аппарата в зависимости от основных параметров, условно можем записать

$$W(p) = f(p, Pe_a, Pe_c, V_a, V_b, V_c, q, v). \quad (8)$$

В уравнении (8)  $Pe_a = u \cdot L/D_{l,a}$ ,  $Pe_c = u \cdot L/D_{l,c}$  – критерии Пекле диффузионных зон ( $u$  – скорость жидкости по сечению диффузионной зоны,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $L$  – длина диффузионной зоны,  $\text{м}$ ). Для дальнейшего получения С-кривой и дисперсии времени пребывания трассера в аппарате, необходимо упрощение вида передаточной функции. Предложено использовать аппроксимацию передаточной функции методом нейронных сетей. С – кривая, описывающая распределение трассера в аппарате, определяется по формуле

$$c(t) = L^{-1}[W(p) \cdot 1] = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot i} \int_{\sigma+i\infty}^{\sigma-i\infty} W(p) \cdot e^{-pt} dt. \quad (9)$$

Интеграл в правой части уравнения (9) находится по одной из теорем разложения [9]. Второй центральный момент, или дисперсия среднего времени пребывания определяется по формуле

$$\sigma_t^2 = \mu_2 = \int_0^{\infty} (t - \bar{t}) \cdot c(t) dt. \quad (10)$$

После определения экспериментального значения  $\sigma_t^2$  и подстановки его в формулу (10), находим значение критерия Пекле для диффузионных зон.

Разработанная гидродинамическая модель структуры потоков позволяет определить коэффициенты продольного перемешивания  $D_{l,a}$  и  $D_{l,c}$  диффузионных зон циркуляционного аппарата со струйно-инжекционным газонаполнением в зависимости от режимов работы. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании массопереноса в аппарате.

#### Литература

1. Яблокова М.А. Гидродинамика и массоперенос при струйном аэрировании жидкостей / М.А. Яблокова, В.Н. Соколов, А.В. Сугак // Теоретические основы химической технологии. –1988. –№ 6. – С.734–739.
2. Соколов В.Н. Аппаратура микробиологической промышленности / В.Н. Соколов, М.А. Яблокова. Л.: Машиностроение. 1988. – 278 с.
3. Агаев К.Э. Совершенствование гидродинамических процессов обработки пищевого сырья в кожухотрубном струйно-инжекционном аппарате: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.18.12. – СПбГУНиПТ. – Санкт-Петербург, 2012. – 16 с.
4. Ведь В.В. Оптимизация аппаратного оформления стадии аммонизации в производстве комплексных минеральных удобрений / В.В. Ведь, В.Л. Юшко, С.Г. Птицин, В.А. Яриз // Вопросы химии и хим.технол. –2008. –№1. – С. 159–163.
5. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль. М.: Химия. 1969. – 624 с.
6. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. М.: Химия. 1976. – 464 с.
7. Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии / В.Б. Коган. Л.: Химия. 1977. – 592 с.
8. Бондарь А.Г. Математическое моделирование в химической технологии / А.Г. Бондарь. –Киев: Вища школа. 1973. – 280 с.
9. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. М.: Высш.шк. 1991. – 400 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Jabloкова M.A. Gidrodinamika i massoperenos pri strujnom azerirovanii zhidkostej M.A. Jablo-kova, V.N. Sokolov, A.V. Sugak Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii. –1988. –# 6. – p.734–739.
2. Sokolov V.N. Apparatura mikrobiologicheskoy promyshlennosti V.N. Sokolov, M.A. Jabloкова. L.: Mashinostroenie. 1988. – 278 p.
3. Agaev K.E. Sovershenstvovanie gidrodinamicheskikh processov obrabotki pishheвого syr'ja v kozhuhotrubnom strujno-inzhekcionnom apparate: Avtoref. dis. kand. tehn. nauk: 05.18.12. – SPbGUNiPT. – Sankt-Peterburg, 2012. – 16 p.
4. Ved' V.V. Optimizacija apparaturnogo oformlenija stadii ammonizacii v proizvodstve kompleksnyh mineral'nyh udobrenij V.V. Ved', V.L. Jushko, S.G. Pticin, V.A. Jariz Voprosy himii i him.tehnol. –2008. –#1. – p. 159–163.
5. Levenshpil' O. Inzhenernoe oformlenie himicheskikh processov O. Levenshpil'. M.: Himija. 1969. – 624 p.
6. Kafarov V.V. Metody kibernetiki v himii i himicheskoy tehnologii V.V. Kafarov. M.: Himija. 1976. – 464 p.
7. Kogan V.B. Teoreticheskie osnovy tipovykh processov himicheskoy tehnologii V.B. Kogan. L.: Himija. 1977. – 592 p.
8. Bondar' A.G. Matematicheskoe modelirovanie v himicheskoy tehnologii A.G. Bondar'. –Kiev: Vishha shkola. 1973. – 280 p.
9. Kafarov V.V. Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh processov himicheskikh proizvodstv V.V. Kafarov, M.B. Glebov. M.: Vyssh.shk. 1991. – 400 p.

УДК 66.011

Ведь В.В.

**ГІДРОДИНАМІКА СТРУКТУРИ ПОТОКУ РІДИНИ В ЦИРКУЛЯЦІЙНОМУ АПАРАТІ ЗІ  
СТРУМЕНЕВО-ІНЖЕКЦІЙНИМ ГАЗОНАПОВНЕННЯМ**

Розроблена модель гідродинаміки структури потоку рідини в циркуляційному апараті зі струменеві-інжекційним газонаповненням. Показано, що апарат можна поділити на дифузійні зони та зону ідеально-го змішання. Отримана передаточна функція апарату, аналіз якої дозволить визначити вплив поздовжнього змішання на структуру потоку і може бути використана при розрахунку масопереносу в апараті.

Ved` V.V.

**HYDRODYNAMICS STRUCTURE OF THE FLOW LIQUID IN THE CIRCULATION APPARATUS  
WITH JET-INJECTION GAS FILLING**

The model of the hydrodynamics structure of the liquid flow in the circulation apparatus with jet-injection gas filling was achieved. It is shown that the apparatus can be divided into the diffusion zone and the perfect mixing zone. The transfer function of the system was defined, the analysis of which will determine the effect of longitudinal mixing on the flow structure and can be used for calculation of mass transfer of the apparatus.