

Бальчугов Алексей Валерьевич,
д.т.н., профессор кафедры МАХП, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: balchug@mail.ru

Бадеников Артем Викторович,
ректор, Ангарский государственный технический университет, e-mail: rector@angtu.ru

Ануфриев Егор Александрович,
студент гр. ТМм-24, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: nir@angtu.ru

РАСЧЕТ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В СУСПЕНЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ

Balchugov A.V., Badenikov A.V., Anufriev E.A.

CALCULATION OF UNIFORMITY OF PARTICLE DISTRIBUTIO IN SUSPENSION USING VELOCITY DISTRIBUTION PARAMETERS

Аннотация. Выполнен расчет равномерности распределения частиц активированного угля в суспензии с использованием параметров распределения скорости в плоскодонном аппарате с мешалкой.

Ключевые слова: перемешивание, равномерность распределения частиц, методика расчета, суспензия, адсорбция.

Abstract. The calculation of the uniformity of the distribution of activated carbon particles in a suspension was performed using the velocity distribution parameters in a flat-bottomed apparatus with a stirrer.

Keywords: mixing, uniformity of particle distribution, calculation method, suspension, adsorption.

Одной из стадий очистки воды от примесей является адсорбция порошковым активированным углем в аппарате с мешалкой. Механическое перемешивание позволяет увеличить скорость адсорбции нежелательных примесей активированным углем и сократить время, затрачиваемое на процесс.

Выполнен расчет эффективности перемешивания водной суспензии порошкового активированного угля в аппарате с дисковой мешалкой с учетом параметров распределения скорости по методике, приведенной в работе [1]. Эффективность перемешивания характеризуется показателем равномерности распределения частиц в суспензии:

$$\frac{x_I}{x}, \quad (1)$$

где x – средняя концентрация частиц активированного угля в суспензии, масс. доли; x_I – локальная (в некоторой точке) концентрация частиц активированного угля в суспензии, масс. доли.

Средняя концентрация частиц угля в суспензии (масс. доли):

$$x = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \quad (2)$$

где m_1 – масса частиц угля в суспензии, кг; m_2 – масса воды в суспензии, кг.

Чем выше показатель равномерности распределения частиц, тем эффективнее перемешивание. При идеально равномерном распределении частиц в суспензии показатель равномерности распределения в любой точке суспензии равен единице:

$$\frac{x_I}{x} = 1. \quad (3)$$

С целью определения эффективности перемешивания выполнен расчет показателя распределения частиц в точке вблизи поверхности суспензии на периферии аппарата x_I/x , а также показатель распределения частиц в точке у стенки аппарата x/x_R (рис. 1).

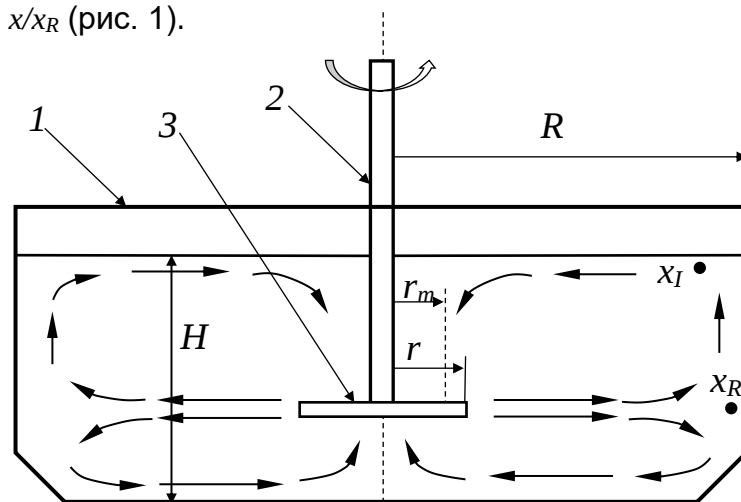


Рисунок 1 – Схема аппарата с дисковой мешалкой:
1 – емкость; 2 – вал; 3 – дисковая мешалка.

Исходные данные для расчета: диаметр плоскодонного аппарата без внутренних устройств $D=0,6$ м ($R=0,3$ м); высота заполнения аппарата $H=0,5$ м; диаметр дисковой мешалки $d=0,05$ м ($r=0,025$ м); вязкость суспензии $\mu=0,001$ Па·с; плотность воды $\rho=998$ кг/м³. Диаметр частиц активированного угля $d_a=0,0001$ м. Средняя массовая концентрация активированного угля в суспензии $x=0,1$ (масс. доли). Истинная плотность частицы угля $\rho_a=2100$ кг/м³.

Угловая скорость вращения диска (рад/с):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n, \quad (4)$$

где n – частота вращения диска, об/с.

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu}. \quad (5)$$

Плотность суспензии:

$$\rho_c = x \cdot \rho_a + (1 - x) \cdot \rho. \quad (6)$$

Скорость осаждения частиц активированного угля:

$$w_o = 1,15 \cdot \left(\frac{d_a \cdot (\rho_a - \rho_c) \cdot g}{\rho_c} \right)^{0,5}. \quad (7)$$

Коэффициент γ для аппарата со свободным уровнем жидкости:

$$\gamma = \frac{4 \cdot H}{R} + 1. \quad (8)$$

Параметр E :

$$E = \frac{\gamma}{\zeta \cdot \text{Re}^{0,25}}. \quad (9)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления мешалки. Для дисковой мешалки как для плоскопараллельного обтекания плоской пластины примем $\zeta \approx 0,2$.

Относительный радиус:

$$\bar{R} = \frac{R}{r}. \quad (10)$$

Параметры распределения скорости ψ_1 и ψ_2 определяются из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} E &= 2,4 \frac{0,1\psi_1^2 + 0,222\psi_1\psi_2 + 0,125\psi_2^2}{\lambda \cdot \bar{R} \cdot [1 + 0,4 \cdot \psi_1 + 0,5 \cdot \psi_2 + 2 \cdot (1 + \psi_1 + \psi_2) \ln \bar{R}]^{1,75}}, \\ \psi_2 &= -0,5 - 1,25 \cdot \psi_1 \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где λ – коэффициент, при турбулентном режиме перемешивания $\lambda = 0,095$ [1].

Радиус максимума окружной скорости определяется из уравнения:

$$4 \cdot \psi_1 \cdot \bar{r}_m^3 + 3 \cdot \psi_2 \cdot \bar{r}_m^2 + 1 = 0, \quad (12)$$

где $\bar{r}_m$ – отношение радиуса максимума окружной скорости к радиусу мешалки:

$$\bar{r}_m = \frac{r_m}{r}. \quad (13)$$

Известно, что при работе мешалки в аппарате формируются потоки жидкости в трёх направлениях: окружное (по окружности), радиальное (от оси аппарата к периферии и обратно) и осевое (по вертикали) (рис. 1, 2) [1]. При этом радиус максимума окружной скорости r_m всегда несколько меньше радиуса мешалки r (рис. 1).

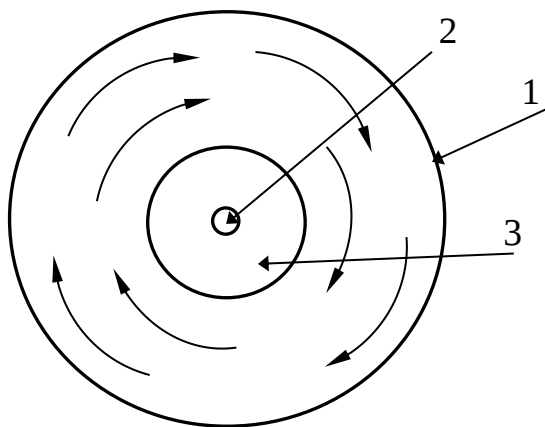


Рисунок 2 – Окружной поток жидкости в аппарате с мешалкой:
1 – ёмкость; 2 – вал; 3 – дисковая мешалка.

Значение коэффициента турбулентной диффузии в осевом потоке на периферии аппарата:

$$D_t = \alpha \cdot \omega^2 \cdot r^2 \frac{(\bar{R} - \bar{r}_m)^2}{\bar{R}^2 - \bar{r}_m^2} \cdot (1,6 \cdot \psi_1 \cdot (\bar{r}_m^5 - 1) + 1,5 \cdot \psi_2 \cdot (\bar{r}_m^4 - 1) + (\bar{r}_m^2 - 1) + 2 \cdot (\psi_1 + \psi_2 + 1) \cdot \ln \bar{R}) , \quad (14)$$

где α – коэффициент.

Циркуляционный расход жидкости в восходящем потоке на периферии:

$$q = k \cdot n \cdot d^3 , \quad (15)$$

где для дисковой (фрезерной) мешалки коэффициент $k=0,014$ [1].

Скорость восходящего потока жидкости на периферии аппарата:

$$w = \frac{q}{\pi \cdot (R^2 - r_m^2)} . \quad (16)$$

Критерий Пекле:

$$Pe = \frac{w_o \cdot H}{D_t} . \quad (17)$$

Показатель равномерности распределения частиц в точке на поверхности суспензии в периферийной зоне (рис. 1):

$$\frac{x_I}{x} = \frac{Pe \cdot \exp(-Pe)}{1 - \exp(-Pe)} . \quad (18)$$

Вспомогательный коэффициент:

$$K = \frac{w_o}{0,05 \cdot (\bar{R} - \bar{r}_m)^2 \sqrt{g \cdot r}} . \quad (19)$$

Показатель равномерности распределения частиц в точке у стенки аппарата (на радиусе R) (рис. 1):

$$\frac{x}{x_R} = \frac{2 \cdot \exp(-K\bar{R}^{1,5}/1,5)}{\bar{R}^2} \cdot \left(\frac{\bar{R}^2 - \bar{r}_m^2}{2} + \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\bar{R}^{1,5p+2} - \bar{r}_m^{1,5p+2}}{(1,5p+2)p!} \left(\frac{K}{1,5} \right)^p \right) . \quad (20)$$

Результаты расчета показателей распределения частиц активированного угля в суспензии по методике (1-20) приведены соответственно на рисунках 3, 4.

Как показывают расчеты, концентрация частиц на поверхности суспензии x_I всегда меньше средней концентрации частиц x . Из рисунка 3 видно, что при частоте вращения до 16 об/с концентрация частиц активированного угля на поверхности суспензии практически равна нулю. При этом частицы концентрируются в нижней части слоя жидкости, вблизи дна емкости, и стремятся осесть на дно под действием силы тяжести. При увеличении частоты вращения концентрация частиц на поверхности суспензии x_I возрастает и достигает 0,25 от средней концентрации x при частоте вращения 50 об/с. Таким образом, при данном режиме перемешивания не обеспечивается равномерное распределение частиц в суспензии. Для повышения эффективности перемешивания можно рекомендовать использовать в данном случае мешалку большего диаметра.



Рисунок 3 – Зависимость показателя равномерности распределения частиц x_l/x от частоты вращения мешалки.



Рисунок 4 – Зависимость показателя равномерности распределения частиц x/x_R от частоты вращения мешалки.

По результатам расчетов (рис. 4), концентрация частиц угля вблизи стенки x_R практически не зависит от частоты вращения мешалки. При этом концентрация вблизи стенки x_R всегда больше средней концентрации частиц в суспензии x за счет действия центробежной силы. Результаты расчета могут быть подтверждены в ходе экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах. Физические основы и инженерные методы расчета. – Л.: Химия, 1984. – 336 с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.