УДК 669.2.88: 66.026.6

С.В.АЛЕКСАНДРОВ
Металлургический факультет,
аспирант кафедры печей, контроля и автоматизации
металлургического производства

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА АППАРАТОВ СМЕШЕНИЯ

Предложен способ оценки эффективности использования рабочего объема трубчатого аппарата с режимом движения потока близким к идеальному. Получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитывать оптимальные значения параметров модели, отвечающие случаю достижения максимального значения коэффициента использования объема аппарата, а также критерий Пекле.

The method of evaluation efficiency use to working volume of a tubular means with a mode of movement stream close to ideal. The reachings, adequate case, of maximum significance of operating ratio volume means, and also magnitude criterion of Peclet are obtained of analytical dependence permitting to expect a best value of parameters of a model.

На эффективность работы аппаратов смешения влияют технологические режимы проводимых в них процессов, а также правильность выбора конструкционного типа, который в значительной степени определяет конечный результат работы.

Основными факторами, влияющими на работу аппаратов любого типа, являются термодинамические, кинетические, массообменные, теплообменные и гидродинамические.

Термодинамические факторы – константы химического и фазового равновесия. Данная группа факторов определяет направление реакции, технологические параметры проведения реакции и оказывает влияние на скорость и селективность всего процесса.

Кинетические факторы – константы скорости и энергии активации основных и побочных реакций, а также истинные и кажущиеся порядки реакции.

Массообменные факторы – коэффициенты массопередачи исходных и промежуточных веществ и конечных продуктов реакции.

Теплообменные факторы – коэффициенты теплопередачи между фазами и коэффициенты теплопередачи между средой и теплообменными устройствами.

Гидродинамические факторы – характеристики межфазной поверхности и перемешивания по сплошной и дисперсной фазам, они оказывают наибольшее влияние на процесс, поскольку являются определяющими для показателей тепло- и массообмена.

Эффективность использования объема технологических аппаратов непрерывного действия, применяемых в гидрометаллургии, зависит от конструктивных особенностей реактора и особенностей проводимого в нем гидрометаллургического процесса. При расчете эффективности использования

рабочего объема химических и гидрометаллургических аппаратов применяют следующие основные показатели [1-3].

Коэффициент заполнения объема аппарата

$$K_з = \frac{V}{V_а},$$

где V и $V_а$ – соответственно рабочий и общий объем аппарата.

Коэффициент использования объема (иногда его называют коэффициентом эффективности реактора)

$$\eta = \frac{\tau_в}{\bar{\tau}} = t_r,$$

где $\tau_в$ – время завершения реакции, проводимой в аппарате идеального вытеснения до требуемой степени превращения вещества ($\bar{X}$); $\bar{\tau}$ – среднее время пребывания частиц в рассматриваемом аппарате ($\tau_в \geq \bar{\tau}$); t_r – минимальное время пребывания частиц в аппарате, необходимое для завершения процесса с требуемой полнотой.

Для оценки общей эффективности использования рабочего объема аппаратов непрерывного действия предлагается использовать следующую систему показателей:

$$\alpha = F(t_r) = F(Kt_R); \quad (1)$$

$$\beta = F(t_R) - F(t_r) = F(t_R) - F(Kt_R); \quad (2)$$

$$\gamma = 1 - F(t_R). \quad (3)$$

Коэффициент недогрузки аппарата α численно равен доле непрореагировавших до конца частиц от общего их количества, выходящего из аппарата. Коэффициент перегрузки аппарата γ определяет долю частиц, которые уже полностью прореагировали и бесцельно занимают объем аппарата, мешая поступлению в реактор свежих порций частиц перерабатываемого материала. Коэффициент использования рабочего объема аппарата β определяется как доля общего рабочего объема аппарата, занятая частицами, имеющими заданную степень превращения и не задерживающимися в нем сверх необходимого для этой цели времени. Остальная часть рабочего объема при этом занята частицами, не успевающими пройти полную стадию обработки (доля объема α) или уже прореагировавшими полностью (доля объема γ).

Показатель устойчивости процесса K характеризует относительные пределы колебания степени извлечения продуктов реакции в непрерывном процессе.

Данная система уравнений была применена для оценки эффективности использования рабочего объема трубчатого реактора непрерывного действия, которые нашли широкое применение в гидрометаллургии.

Для описания распределения времени пребывания частиц в реакторе используют однопараметрическую диффузионную модель, тогда уравнения (1), (2), (3) принимают следующий вид:

$$\alpha = F(Kt_R) = 1 - 0{,}5\mathrm{erf}\left(0{,}5\sqrt{\mathrm{Pe}}\frac{1-Kt_R}{\sqrt{Kt_R}}\right); \quad (4)$$

$$\beta = F(t_R) - F(Kt_R) =$$

$$= 0{,}5\left[\mathrm{erf}\left(0{,}5\sqrt{\mathrm{Pe}}\frac{1-Kt_R}{\sqrt{Kt_R}}\right) - \mathrm{erf}\left(0{,}5\sqrt{c}\frac{1-t_R}{\sqrt{t_R}}\right)\right]; \quad (5)$$

$$\gamma = 1 - F(t_R) = 0{,}5\mathrm{erf}\left(0{,}5\sqrt{\mathrm{Pe}}\frac{1-t_R}{\sqrt{t_R}}\right), \quad (6)$$

где $F(t)$ – интегральная функция распределения времени пребывания материала в аппарате, характеризующая долю частиц материала, вышедших из аппарата к моменту времени t; $K = t_r / t_R$; $\mathrm{Pe} = wl/E$ – критерий Пекле; w – линейная скорость движения потока жидкости; l – длина трубчатого реактора; E – коэффициент диффузии; $t_R = \tau_R / \bar{\tau}$ – максимальное время, необходимое для завершения процесса с требуемой полнотой; $\mathrm{erf} = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right)\int_0^z e^{-t^2} dt$ – интеграл ошибок Гаусса.

Используя уравнения (4)-(6), можно построить тройные диаграммы $\alpha - \beta - \gamma$, от-

ражающие взаимосвязь между показателями α, β и γ, а также коэффициентом устойчивости процесса *K*.

Положение максимумов на кривых, отвечающих постоянным значения показателя *K*, зависит от вида кривых функций, распределения времени пребывания частиц в аппарате или, иными словами, от гидродинамической обстановки, созданной в реакторе, которая характеризуется критерием Pe. Используя тройные диаграммы $\alpha-\beta-\gamma$, можно построить диаграмму $\beta_0 - K - t_{r,R}$, отражающую взаимосвязь между оптимальными значениями коэффициента устойчивости процесса *K* и относительным временем пребывания частиц $t_{r,R}$.

Показатели α, β и γ могут быть использованы и для оценки эффективности химического процесса, протекающего в аппаратах периодического и полунепрерывного действия. В данном случае в качестве критерия, используемого для оценки эффективности работы аппарата периодического или полунепрерывного действия, следует выбирать не распределение времени пребывания частиц, а кинетическую функцию, которая характеризует степень взаимодействия частиц за время τ.

Определение оптимальных значений показателей β_0 возможно не только графически, но и аналитическим методом, сущность которого сводится к нахождению первой производной $d\beta/dt_R$, значение которой приравнивалось к нулю:

$$\frac{d\beta}{dt_R} = F'(t_R) - F'(Kt_R) = 0 . \qquad (7)$$

После несложных преобразований уравнение (7) примет вид

$$\mathrm{Pe} = \frac{2Kt_R \ln(1/K)}{(1-Kt_R^2)(1-K)} = \frac{2t_r \ln(1/K)}{(1-t_r^2/K)(1-K)} . \qquad (8)$$

Полученная зависимость применима только для случая, когда $t_R \le \sqrt{\frac{1}{K}}$.

В общем случае уравнение для определения значения времени t_R имеет вид

$$t_R = \sqrt{\chi^2 + \frac{1}{K}} - \chi , \qquad (9)$$

где $\chi = \left[\ln(1/K)/\mathrm{Pe}(1-K)\right]$.

Максимальное значение коэффициента использования рабочего объема трубчатого реактора может быть рассчитано по уравнению, полученному в результате подстановки зависимости (8) в (5):

$$\beta_0 = 0{,}5\left[\mathrm{erf}\left\{\sqrt{\mathrm{Pe}}/2\,\frac{1-K\left(\sqrt{\chi^2+\frac{1}{K}}-\chi\right)}{\sqrt{K\left(\sqrt{\chi^2+\frac{1}{K}}-\chi\right)}}\right\}\right] -$$

$$-\,\mathrm{erf}\left\{\sqrt{\mathrm{Pe}}/2\,\frac{1-\left(\sqrt{\chi^2+\frac{1}{K}}-\chi\right)}{\sqrt{K\left(\sqrt{\chi^2+\frac{1}{K}}-\chi\right)}}\right\} . \qquad (10)$$

Применение зависимостей (4)-(6), (8)-(10) позволяет решать ряд практических задач, связанных с определением оптимальных значений показателей β_0, *K*, $t_{r,R}$, Pe, а также объема и производительности установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты в химической технологии. М.: Химия, 1971. 320 с.

2. *Кафаров В.С.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия, 1968. 230 с.

3. *Левеншпиль О.И.* Инженерное оформление химических процессов. М.: Химия, 1969. 170 с.

Научный руководитель д.т.н. проф. *И.Н.Белоглазов*