

Б. КУМИСБЕКОВА, А. С. МУРАТОВ, Л. ТАШИМОВ

РЕСУРСЫ СНИЖЕНИЯ ВЫСОТЫ РАБОЧИХ ЗОН КОЛОННЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ МЕЖФАЗНОЙ КОНВЕКЦИИ

Теория межфазной конвекции [1, 2] позволяет сделать вывод о возможности снижения рабочей высоты тепломассообменных аппаратов за счет интенсификации процессов переноса в режимах интенсивной межфазной конвекции.

В нашей статье рассмотрены основные аспекты этой проблемы и определены реальные ресурсы снижения высоты колонных аппаратов химической промышленности. При этом для обеспе-

чения корректности модели будем считать, что лимитирующей массоперенос фазой является жидккая дисперсная фаза.

Рассмотрим для определенности режим противотока. При противотоке фаз в режимах спонтанной межфазной конвекции общий коэффициент массопередачи по дисперсной фазе в зависимости от движущей силы запишем в виде:

$$K_{og} = K_g^D + K_g^{conv} \left[\left(x - \frac{y}{m} \right) - \Delta x_{cr} \right]$$

при $x - \frac{y}{m} > \Delta x_{cr}$; (1)

$$K_{og} = K_g^D \text{ при } x - \frac{y}{m} < \Delta x_{cr}, \quad (2)$$

где x - концентрация в дисперсной фазе, y - в сплошной, Δx_{cr} - критическая движущая сила, K_g^D - коэффициент массопереноса по дисперсной фазе в отсутствие спонтанной межфазной конвекции.

Уравнение материального баланса по дисперсной фазе для элемента колонны длины dh :

$$\frac{dh}{x^* - x} = \frac{\alpha S K_{og}}{V_g} dh, \quad (3)$$

где α - в данном случае удельная поверхность контакта фаз, S - поперечное сечение колонны, V_g - объемная скорость подачи дисперсной фазы.

Уравнение линии равновесия:

$$y^* = mx, \quad x^* = \frac{y}{m}. \quad (4)$$

Уравнение рабочей линии:

$$x - x_2 = L(y - y_2), \quad (5)$$

где $L = \frac{V_c}{V_g}$, V_c - объемная скорость подачи сплошной фазы.

Отсюда следует выражение для безразмерной высоты колонны:

$$Z = \frac{HV_g}{\alpha S K_{og}^D}, \quad (6)$$

необходимой для достижения заданной степени извлечения:

$$\Phi_{g2} = \frac{x_2 - x_1}{x_2^* - x_1}, \quad (7)$$

где индекс 1 относится к месту подачи дисперсной фазы, 2 - к месту ввода сплошной.

Введем специальный параметр κ , который характеризует интенсивность спонтанной межфазной конвекции:

$$\kappa = K_g^{conv} (x_1 - x_2^*). \quad (8)$$

Тогда для безразмерной высоты колонны получаются соотношения:

$$\text{при } w_{cr} < 1 - \Phi_{g2}, \quad w_{cr} = \frac{\Delta x_{cr}}{x_1 - x_2^*}.$$

$$Z = \frac{G}{G-1} \frac{1}{1 - \kappa w_{cr}} \times$$

$$\times \ln \left[\frac{1 - \frac{\Phi_{g2}}{G}}{1 - \Phi_{g2}} \frac{1 + \kappa (1 - \Phi_{g2} - w_{cr})}{1 + \kappa (1 - \Phi_{g2}/G - w_{cr})} \right]; \quad (9)$$

$$\text{при } 1 - \Phi_{g2} < w_{cr} < 1 - \frac{\Phi_{g2}}{G};$$

$$Z = Z_{cr} + \frac{G}{G-1} \ln \left(\frac{w_{cr}}{1 - \Phi_{g2}} \right), \quad (10)$$

Здесь w_{cr} - безразмерная критическая движущая сила, $G = l\psi$.

Причем интенсивный режим может существовать по всей высоте колонны, либо только в ее части $Z < Z_{cr}$.

В последнем случае спонтанная межфазная конвекция прекращается при $Z = Z_{cr}$ и при $Z > Z_{cr}$ массоперенос идет в чисто диффузионном режиме.

При $\kappa = 0$ рассчитанные по описанной методике высоты колонны совпадают с высотой при обычном режиме массопереноса:

$$Z_0 = \frac{G}{G-1} \ln \left(\frac{1 - \frac{\Phi_{g2}}{G}}{1 - \Phi_{g2}} \right). \quad (11)$$

Расчеты показывают, что при достаточно малой критической движущей силе возможно уменьшение необходимой высоты колонны в несколько раз, что будет проиллюстрировано дальше на графиках.

Эффективность интенсивного режима переноса будем характеризовать отношением высоты колонны, при которой начальная движущая сила уменьшается в два раза при интенсивном

режиме со спонтанной межфазной конвекцией по сравнению с таковой в обычном режиме:

$$Z_{\gamma_2} = \frac{G}{G+1} \frac{1}{1-\kappa w_{cr}} \ln \left[\frac{2+\kappa(1-2w_{cr})}{1+\kappa(1-w_{cr})} \right] \quad \text{при } w_{cr} < \frac{1}{2}; \quad (12)$$

$$Z_{\gamma_2} = Z_{cr} + \frac{G}{G+1} \ln(2w_{cr}) \quad \text{при } \frac{1}{2} < w_{cr} < 1; \quad (13)$$

На рис. 1 показаны некоторые характерные зависимости, полученные путем численного эксперимента. Графики показывают, что в интенсивном режиме равновесие наступает существенно быстрее и при использовании режима спонтанной межфазной конвекции необходимая высота колонны теоретически может быть уменьшена в несколько.

Анализ показывает, что с возрастанием удельной нагрузки G теоретически возможное снижение высоты колонны может быть весьма существенным, практически на порядок. Естественно, ожидать такого снижения в производственных условиях не стоит, поскольку процесс осложняется влиянием многих неучтенных факторов.

Большой объем экспериментальных исследований явлений межфазной нестабильности был проведен сотрудниками института ГИАП под руководством Дильмана В.В. Было установлено, что резкое ускорение хемосорбции наблюдается для процесса хлорирования толуола в ламинарном режиме течения жидкой пленки, и при взаимодействии аммиака с раствором уксусной кислоты, а также в процессах абсорбции диоксида углерода растворамиmonoэтаноламина и толуолом [3].

На рис. 2 показаны отдельные результаты проведенных ими экспериментов в сравнении с нашими оценками.

Из рис. 2 видно, что расчетное время потери устойчивости t^* , рассчитанное по нашей методике, значительно ближе к опытным данным, чем рассчитанное по формулам из работы [4]. Это время составляет порядка 50 с для системы $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ и приблизительно 60 с для системы ксенон-вода.

Этот эффект также отмечен в физическом эксперименте (см. опытные данные В. Лотхова,

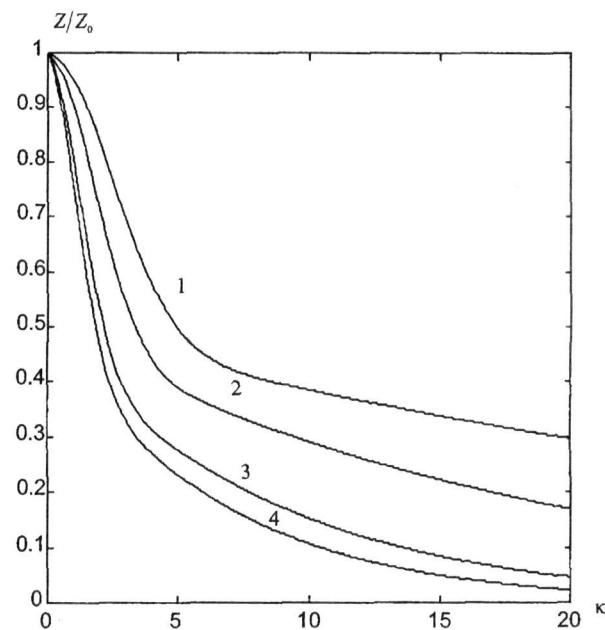


Рис. 1. Теоретически возможное снижение рабочей высоты колонны при интенсивной межфазной конвекции:

1 - $G = 1,5, \varphi_g = 0,8, w_{cr} = 0,3$;

2 - $G = 0,9, \varphi_g = 0,8, w_{cr} = 0$;

3 - $G = 1,5, \varphi_g = 0,5, w_{cr} = 0,3$;

4 - $G = 3, \varphi_g = 0,5, w_{cr} = 0$

В. Дильмана и др. в Отчете ИОНХ РАН № 94-4674 для фонда INTAS, 1997). Заметим, что известные ранее методики расчета принципиально не позволяют описать подобный эффект, связанный с режимным переходом.

Кроме того, расчеты по стандартной методике для системы CO_2 – растворы monoэтаноламина вообще не предсказывают экспериментально наблюдаемого резкого перелома на кривой временной динамики процесса, в то же время, предлагаемые подходы не только правильно прогнозируют значения параметров, при которых происходят изменения режимов, но и дают оценки управляющих параметров в пределах 10% ошибки. В то же время при улавливании ксенона водой никаких переломов в графиках интенсивности нет, так как нет и поверхностной активности улавливаемого компонента.

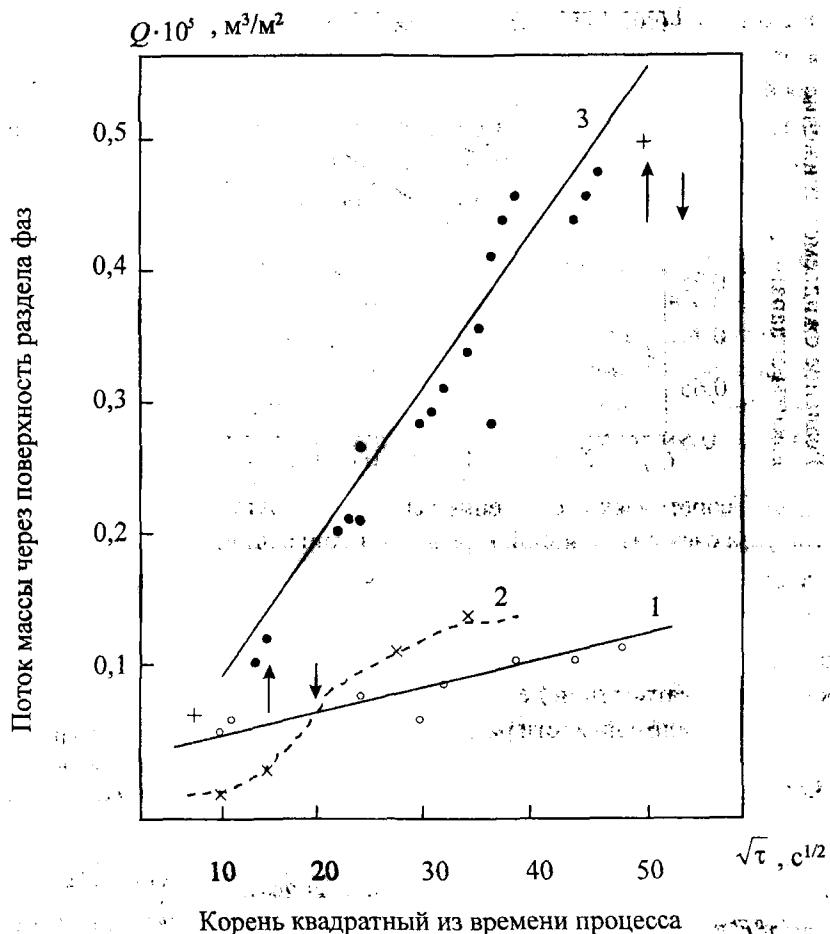
Расчеты показывают, что при достаточно малой критической движущей силе возможно уменьшение необходимой высоты колонны в несколько раз. В то же время турбулизация потоков в значительной степени гасит эффект межфазной

Рис. 2. Изменение во времени количества диоксида углерода и ксенона, прошедших при межфазном переносе через поверхность воды:

- 1 - расчет по стандартной методике без учета межфазной нестабильности;
- 2 - опытные данные для системы $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$;
- 3 - опытные данные для системы ксенон-вода.

Расчетное критическое время:

- + - для системы диоксид углерода-вода;
- ↑ - для системы диоксид углерода- толуол;
- ↓ - для системы ксенон-вода



нестабильности, обусловленный поверхностной активностью реагентов. Поэтому для разработки полуэмпирической методики расчета высоты аппарата были использованы теоретические выводы работы и большой объем экспериментальных исследований явлений межфазной нестабильности, который был проведен сотрудниками института ГИАП под руководством В.В. Дильмана. При сравнении экспериментальных данных по снижению высоты единицы переноса были использованы системы: $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$, CO_2 - растворыmonoэтаноламина и CO_2 – толуол.

В результате обработки всего массива данных, доступных из литературы по этим системам, получили следующие соотношения, позволяющие внести поправки в теоретический расчет с учетом возмущающего влияния турбулентных пульсаций при возрастании чисел Рейнольдса по жидкости и газу:

$$Z/Z_0 = [(Z/Z_0)_T - 1] \exp(-f_*(\text{Re}_G, \text{Re}_K)) + 1, \quad (14)$$

где

$$f_*(\text{Re}_G, \text{Re}_K) = \quad (15)$$

$$= 6,1 \cdot 10^{-9} \text{Re}_G^2 + 3,3 \cdot 10^{-9} \text{Re}_G \text{Re}_K + 7,4 \cdot 10^{-8} \text{Re}_K^2.$$

На рис. 3 показаны результаты применения изложенной методики для расчета реально возможного снижения высоты аппарата.

Методика расчета состоит из следующих шагов: во-первых, рассчитывается высота колонны Z_0 по стандартной методике; во-вторых, рассчитывается максимально возможное снижение этой высоты $(Z/Z_0)_T$ за счет межфазной нестабильности; в третьих, рассчитывается реально ожидаемое снижение высоты $(Z/Z_0)_T$ с учетом влияния турбулизации потоков – по формулам (14), (15).

Выводы

1. Установлены ресурсы уменьшения рабочей высоты колонных аппаратов в режимах интенсивной межфазной поверхностной конвекции и разработана инженерная методика расчета коэффициентов уменьшения рабочей высоты колонн.

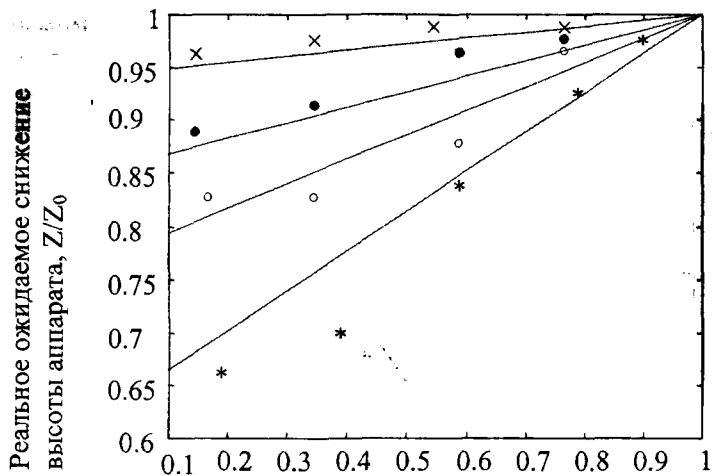


Рис. 3. Возможное снижение высоты хемосорбционных аппаратов за счет межфазной конвекции:

- * - $Re_G = 10000; Re_K = 1500$;
- - $Re_G = 15000; Re_K = 2400$;
- - $Re_G = 10000; Re_K = 3200$;
- × - $Re_G = 20000; Re_K = 2000$.

Сплошная линия – расчет по соотношениям (43), (44)

Теоретическое снижение высоты аппарата
за счет интенсивной межфазной конвекции, $(Z/Z_0)_t$

2. Проведено сопоставление полученных теоретических оценок с опытными данными и показана адекватность модели, а также даны оценки области применимости разработанной теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ташиев Л.Т. Конвективный тепло- и массообмен в пленочных процессах химической технологии // Вопросы моделирования и устойчивости. Алматы: Білім, 1999. 200 с.
2. Крылов В.С. Теоретические аспекты интенсифика-

ции процесса межфазного обмена // Теор. основы хим. технол. 1983. Т. 17, №1. С. 15-25.

3. Дильман В.В., Аксельрод Ю.В., Хуторянский Ф.М. О механизме массопередачи в условиях поверхностной конвекции // Теор. основы хим. технол. 1977. Т. 11, №1. С. 11-19.

4. Аксельрод Ю.В. Газожидкостные хемосорбционные процессы // Кинетика и моделирование. М.: Химия, 1989. С. 240.

МКТУ ШИ им. К. А. Ясаяу;

ЮКГУ им. М.Ауезова

Поступила 20.06.08г.