

G.E. Sakhmetova¹, A.M. Brener¹, O.S. Balabekov²

¹ M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent;

² South Kazakhstan State Pedagogical Institute, Shymkent

17-07-70@mail.ru

MATHEMATICAL MODELLING OF THE SCALE-UP PHENOMENON IN PURIFICATION OF WET TYRE TOWERS

Abstract. The aim of this work is to develop a model approach to the description of scale-up effect in the large scale packing towers of wet-type, applying to the co-current and counter current regimes. The basic idea is to average the dependences of the specific volumetric mass transfer coefficient for some typical cross sections of the apparatus. The whole height of the tower should be divided into several consecutive cells which vary in different mass-transfer coefficients averaged over the cross section of the columns. Determination of the height characteristics of each cell is carried out on the basis of solving the hydrodynamic model, and the volumetric mass transfer coefficient corresponding to the average one in each cell is produced by the experimental data obtained from small laboratory installation.

Keywords: biogas, gas mixture, separation, purification column, chemisorption cleaning, mass transfer, scale effect, concentration.

УДК 628.336.6

Г.Е. Сахметова¹, А.М. Бренер¹, О.С. Балабеков²

¹Южно-Казахстанский государственный университет им. М.Ауэзова, г. Шымкент;

²Южно-Казахстанский государственный педагогический институт, г. Шымкент

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА В ОЧИСТНЫХ КОЛОННАХ МОКРОГО ТИПА

Аннотация. Целью работы является разработка модельного подхода к описанию масштабного эффекта в колонных аппаратах мокрого типа для случаев режима противотока и прямотока. Основная идея работы заключается в усреднении зависимости объемного коэффициента массообмена по некоторым характерным поперечным сечениям аппарата. При этом высота аппарата разбивается на несколько последовательных ячеек, отличающихся различными усредненными по сечению колонны коэффициентами массообмена. Определение характерной высоты каждой такой ячейки определяется на основании решения задач гидродинамического моделирования, а значение соответствующего усредненного в каждой ячейке объемного коэффициента массообмена производится по экспериментальным данным, полученным на малогабаритных лабораторных установках.

Ключевые слова: биогаз, газовая смесь, сепарация, очистная колонна, хемосорбционная очистка, массообмен, масштабный эффект, концентрация.

1. Введение

Очистные колонны мокрого типа, реализующие инженерное оформление процессов абсорбции хемосорбции, получили широкое распространение в промышленности [1, 2]. Находят они также применение и в технологических схемах разделения биогаза на компоненты [3].

Сейчас известно несколько способов разделения биогаза на компоненты:

- адсорбционный способ, основанный на селективной адсорбции углекислого газа при пропускании биогаза через слой адсорбента. Этот метод требует предварительного сжатия смеси до давления 2–5 МПа [3];

- объемное растворение углекислого газа в жидких химических средах. При этом предусматривается пропускание биогаза под давлением до 2 МПа через жидкую среду [2, 3];

- способ мембранных технологий, основанный на различии коэффициентов диффузии газов через некоторые полимерные материалы. В этом способе разделение осуществляется путем продавливания биогаза, находящегося при высоком давлении, через мембрану, обладающую избирательной проницаемостью [3].

Процесс взаимодействия фаз в колонных аппаратах оформляется в виде двух основных схем: в режиме противотока и режиме прямотока [4]. Если речь идет об очистке биогаза в хемосорбционных колоннах, то, как правило, используемые в настоящее время биогазовые смеси, подвергаемые очистке, содержат не менее 70% метана [3]. Поэтому процесс осуществляется в режиме противотока, т.к. основным компонентом биогаза является метан, плотность которого составляет порядка 0.68 кг/м³.

В то же время, при большой начальной концентрации таких компонентов, как диоксид углерода, сероводород и при наличии других тяжелых газов плотность газовой смеси может превысить плотность воздуха при нормальных условиях. Такая проблема может стать актуальной, когда нужно будет извлекать метан из более бедных по составу газовых смесей. Тогда в ряде случаев целесообразно использование режима прямотока.

Кроме того, использование хемосорбционной очистки в колонных аппаратах в схемах сепарации биогаза может позволить добиться более высокой селективности на стадии мембранного разделения [3] и получить, помимо биогаза, некоторые полезные побочные продукты, например, аммиачную воду и другие.

В то же время, при проектировании схем сепарации биогаза возникает проблема масштабного перехода при проектировании очистного аппарата. Хотя эта проблема в целом хорошо известна [5], однако в случае наличия нескольких стадий сепарационного процесса в аппаратах различного типа, она приобретает особое значение. Как уже было выше отмечено, такая многостадийная обработка биогаза может стать актуальной при глубокой очистке, что является важной задачей также с точки зрения охраны окружающей среды.

В настоящей статье рассмотрен модельный подход к описанию масштабного эффекта в колонных аппаратах мокрого типа для случаев режима противотока и прямотока.

2. Математическая модель

С точки зрения масштабирования аппаратов, наиболее актуальными типами аппаратов являются аппараты насадочного типа, т.к. в них может быть организовано более равномерное распределение взаимодействующих жидкой и газовой фаз. В таких аппаратах зонами локализации наиболее интенсивного массообмена являются области насадочных тел, смоченных жидкостью и обтекаемых газовым потоком [6, 7].

Характер распределения жидкости по насадочному слою и картина его обтекания газовым потоком достаточно сложны [6, 7, 8]. Однако, полагая в дальнейшем, что габариты колонны и ее диаметр намного больше характерных размеров насадочных тел, будем описывать процессы распределения фаз в аппарате и процессы массообмена уравнениями непрерывного взаимодействия фаз.

Схемы потоков для режимов противотока и прямотока показаны на рисунке 1. Рассмотрим далее оба режима.

2.1 Противоток жидкой и газовой фаз

Уравнение массопередачи в абсорбере

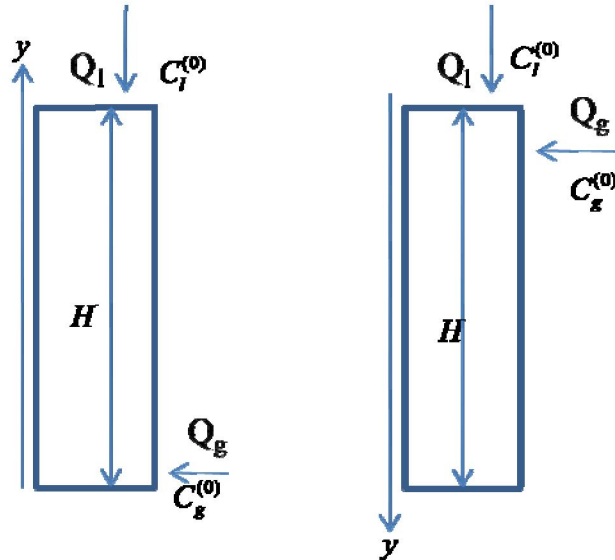
$$K_v F dy = -Q_g \frac{dC_g}{C_g - C_g^*} \quad (1)$$

Используя закон Генри [9] получаем

$$K_v F dy = \frac{Q_g dC_g}{\beta C_l - C_g} \quad (2)$$

Уравнение рабочей линии процесса для режима противотока (рис. 1 а)

$$C_g = \frac{Q_l}{Q_g} (C_l - C_l^{(0)}) + C_g^{(H)} \quad (3)$$



а) Противоток б) Прямоток

Рисунок 1- Схема потоков в колонном аппарате

Используя соотношения (1), (2) и уравнение рабочей линии (3), после преобразований получаем интегральное уравнение массообмена [9]

$$\int_0^y \int_F K_v ds d\omega = \frac{Q_l}{\lambda - 1} \ln \left(\frac{C_g (\lambda - 1) - \lambda (1 - \eta) C_g^{(0)} + \beta C_l^{(0)}}{C_g^{(0)} (\lambda - 1) - \lambda C_g^{(0)} + \beta C_l^{(0)}} \right) \quad (4)$$

В соотношении (4) введены следующие контрольные параметры процесса: абсорбционный фактор λ [4] и степень абсорбции η

$$\lambda = \frac{Q_l}{\beta Q_g}, \quad \eta = \frac{C_g^{(0)} - C_g^{(H)}}{C_g^{(0)}} \quad (5)$$

Важной особенностью формулы (4) является явное использование идеи о масштабном эффекте. Это выражается в том, что объемный коэффициент массообмена полагается зависящим от области его измерения, локализованной в сечении и в зависимости от высоты сечения.

Отсюда следует формула для расчета распределения концентрации улавливаемого компонента по высоте колонны

$$C_g = \frac{C_g^{(0)}}{1-\lambda} \left[(1-\lambda\eta) \exp\left(\frac{\lambda-1}{Q_g} \int_{F_0}^y \int K_v ds d\omega\right) - \lambda(1-\eta) \right] + \frac{\beta C_l^{(0)}}{1-\lambda} \left[1 - \exp\left(\frac{\lambda-1}{Q_g} \int_{F_0}^y \int K_v ds d\omega\right) - \lambda(1-\eta) \right] \quad (6)$$

Если в начальном сечении в орошающей жидкости отсутствует в растворенном или химически связанном виде улавливаемый компонент, то из (5) получаем более простое выражение

$$C_g = \frac{C_g^{(0)}}{1-\lambda} \left[(1-\lambda\eta) \exp\left(\frac{\lambda-1}{Q_g} \int_{F_0}^y \int K_v ds d\omega\right) - \lambda(1-\eta) \right] \quad (7)$$

Идея дальнейшего упрощения полученной модели основывается на соображениях, впервые предложенных в работах [7, 9]. А именно, подобно тому, как это делается в диффузионной модели перемешивания [7], положим, что произведено усреднение зависимости среднего объемного коэффициента массообмена по некоторым характерным поперечным сечениям аппарата. Тогда всю высоту аппарата можно разбить на несколько последовательных ячеек, отличающихся различными усредненными по сечению колонны коэффициентами массообмена.

Определение характерной высоты каждой такой ячейки определяется на основании решения задач гидродинамического моделирования [8], а значение соответствующего усредненного в каждой ячейке объемного коэффициента массообмена производится по экспериментальным данным, полученным на малогабаритных лабораторных установках [9]. Таким образом, осуществляется декомпозиция сложной сопряженной модели на основании полуэмпирических соображений.

Используя последовательно эту идеологию, приходим к формулам для расчета степени абсорбции в колонном аппарате с учетом неравномерности распределения потоков по сечению и по высоте колонны:

$$\eta = \frac{\exp\left(\frac{\lambda-1}{Q_g} F \sum_{i=1}^n \bar{K}_{g(i)} H_i\right) - 1}{\lambda \exp\left(\frac{\lambda-1}{Q_g} F \sum_{i=1}^n \bar{K}_{g(i)} H_i\right) - 1} - \frac{\beta C_l^{(0)}}{C_g^{(0)}} \frac{\exp\left(\frac{\lambda-1}{Q_g} F \sum_{i=1}^n \bar{K}_{g(i)} H_i\right) - 1}{\lambda \exp\left(\frac{\lambda-1}{Q_g} F \sum_{i=1}^n \bar{K}_{g(i)} H_i\right) - 1} \quad (8)$$

В соотношении (8) средние коэффициенты массообмена определяются в характерных ячейках по соотношениям [9]

$$\bar{K}_{g(i)} = \frac{\int_{F_{h_i}}^{F_{h_{i+1}}} \int K_v ds d\omega}{F} \quad (9)$$

Высота каждой характерной ячейки, соответственно

$$H_i = h_{i+1} - h_i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n H_i = H \quad (11)$$

где

Из выражения (8) видно, что можно ввести интегральный фактор масштабного эффекта в виде

$$\Phi = \frac{\lambda - 1}{Q_g} F \sum_{i=1}^n \bar{K}_{g(i)} H_i \quad (12)$$

Тогда выражение для расчета полной степени абсорбции при противотоке приобретает компактный вид

$$\eta_{\downarrow} = \frac{\exp(\Phi) - 1}{\lambda \exp(\Phi) - 1} \frac{\beta C_l^{(0)}}{C_g^{(0)}} \frac{\exp(\Phi) - 1}{\lambda \exp(\Phi) - 1} \quad (13)$$

2.2 Прямоток жидкой и газовой фаз

Случай прямотока отличается прежде всего уравнением рабочей линии процесса абсорбции

$$C_g = -\frac{Q_l}{Q_g} (C_l - C_l^{(0)}) + C_g^{(0)} \quad (14)$$

Интегральное уравнение массообмена приобретает вид

$$\int_F^y K_v ds d\omega = \frac{Q_l}{1 - \lambda} \ln \left(\frac{C_g (1 - \lambda) + \lambda C_g^{(0)} + \beta C_l^{(0)}}{C_g^{(0)} (1 - \lambda) + \lambda C_g^{(0)} + \beta C_l^{(0)}} \right) \quad (15)$$

Интегральный фактор масштабного эффекта имеет тот же вид (12).

Выражение для расчета полной степени абсорбции приобретает вид

$$\eta_{\uparrow} = -\frac{\exp(\Phi) - 1}{\lambda \exp(\Phi) - 1} + \frac{\beta C_l^{(0)}}{C_g^{(0)}} \frac{\exp(\Phi) - 1}{\lambda \exp(\Phi) - 1} \quad (16)$$

Полученные выражения имеют особенность при $\lambda = 1$. Вместе с тем, такая ситуация является крайне маловероятной, но в этом редком случае необходимые формулы получаются путем несложного предельного перехода [9].

Заключение

Предложенная математическая модель масштабного перехода в процессе расчета степени улавливания газовых компонентов из газовых смесей может быть использована в качестве основы инженерной методики расчета крупногабаритных колонных аппаратов мокрого типа, т.к. позволяет произвести декомпозицию модели, рассматривая отдельно гидродинамические характеристики насадочного аппарата, и, используя опытные данные, полученные на малогабаритных лабораторных установках.

Эта модель обладает достаточной гибкостью и легко может быть адаптирована как для описания физической абсорбции в крупногабаритных колонных аппаратах, так и хемосорбции, что особенно важно для оптимального проектирования очистных аппаратов, используемых в сложных многостадийных схемах газовой сепарации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Семененко И.В., Кравец В.А. Комплексная переработка отходов животноводства с получением органических удобрений и биогаза // Труды I Международной конференции «Энергия из биомассы». – Киев, 2002.
- [2] Назаренко В.А. Обогащение биогаза метаном с помощью мембранного сепаратора // Научно-технический бюллетень по электрификации сельского хозяйства. – 1989. – №1. – С.56-62.
- [3] Стребков Д.С., Ковалев А.А. Биогазовые установки для обработки отходов животноводства. // Техника и оборудование для села - 2006. - №11. - С.28-30
- [4] Рамм В. М. Абсорбция газов, М. Химия, 1976.

- [5] Розен А. М. Масштабный переход в химической технологии, М. Химия, 1980.
- [6] Brenner A.M., Bolgov N.P., Sokolov N.M., Tarat E.Ya. The application of random walk methods to the modelling of liquid distribution over the regular shelf packing/ *Theor. Found. of Chem. Eng.*, Vol. 15, No1, 1981, P. 62-67.
- [7] Brenner A.M. Adaptation of random walk methods to the modelling of liquid distribution in packed columns/ *Advances in Fluid Mechanics IV/Eds. Rahman M., Satish M.G.*, 2002, P. 291-300.
- [8] Balabekov B.Ch., Brenner A.M., Balabekov O.S. Numerical modeling of heat and mass transfer processes upon the flowing of regular structures by gas-drop flow/ *Theor. Found. of Chem. Eng.*, Vol. 50, No3, 2016, P. 273-285.
- [9] Бренер А.М., Болгов Н.П., Тарат Э.Я., Соколов Н.М., Орымбетов Э. О расчете степени абсорбции в аппарате с регулярной полочной насадкой/ *Экологическая технология и очистка промышленных выбросов/ Под ред. Тарата Э.Я., Туболкина А.Ф.*, 1980, Ленинград, С. 42-57.

REFERENCES

- [1] Semenenko I.V., Kravec V.A. Complex processing of animal waste with the receipt of organic fertilizers and biogas . *Proceedings of the I International conference "Biomass for Energy".Kiev, 2002.* (in Russ.)
- [2] Nasarenko V.A. The enrichment of biogas methane using a membrane separator . *Scientific and technical Bulletin of rural electrification 1989*, №1.56-62. (in Russ.)
- [3] Strebkov D.S., Kovalev A.A. Biogas plant for processing animal waste. *Machinery and equipment for the village. 2006*, №11.28-30 (in Russ.)
- [4] Ramm V. M. Absorption of gases , М.: Himija,1976. (in Russ.)
- [5] Rosen A. M. Large-scale transition in chemical technology, М.: Himija,1980. (in Russ.)
- [6] Brenner A.M., Bolgov N.P., Sokolov N.M., Tarat E.Ya. The application of random walk methods to the modelling of liquid distribution over the regular shelf packing/ *Theor. Found. of Chem. Eng.*, Vol. 15, No1, 1981, P. 62-67. (in Eng.)
- [7] Brenner A.M. Adaptation of random walk methods to the modelling of liquid distribution in packed columns. *Advances in Fluid Mechanics IV.Eds. Rahman M., Satish M.G.*, 2002, P. 291-300. (in Eng.)
- [8] Balabekov B.Ch., Brenner A.M., Balabekov O.S. Numerical modeling of heat and mass transfer processes upon the flowing of regular structures by gas-drop flow. *Theor. Found. of Chem. Eng.*, Vol.50, No3, 2016, 273-285 (in Eng.)
- [9] Brenner A.M., Bolgov N.P., Tarat E.Ya., Sokolov N.M., Orimbetov Ya . On the calculation of the degree of absorption in the apparatus with a regular nozzle shelf. *Environmental technology and treatment of industrial emissions. Leningrad.1980*, 42-57. (in Russ.)

Г.Е. Сахметова¹, А.М. Бренер¹, О.С. Балабеков²

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, Шымкент қаласы, Қазақстан

²Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік педагогикалық институты, Шымкент қаласы, Қазақстан

СУЛЫ ТИПТІ ТАЗАЛАЙТЫН БАҒАНАЛАРДА АУҚЫМДЫ ӘСЕРІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аннотация. Жұмыстың мақсаты - тура және қарсы ағымдағы режимде сулы типті бағаналы аппараттарда ауқымды әсерін сипаттау үшін моделді тәсілді өңдеу. Жұмыстың негізгі идеясы, ол аппаратын кейбір типтік көлденең қимасы бойынша орташа көлемді массаалмасу коэффициентінің байланысын орташалау болып табылады. Аппаратың биіктігі бірнеше тізбектелген ұяшықтарына бөлінеді және бағананың қимасы бойынша орташаланған массаалмасу коэффициентімен ерекшеленеді. Әрбір осындай ұяшықтың тән биіктігін анықтауы гидродинамикалық модельдеу шешу негізінде анықталады және әр ұяшығында орташаланған көлемді масса коэффициентінің мәні шағын зертханалық қондырғыларда эксперименттік деректермен өндіріледі.

Түйін сөздер: биогаз, газ қоспасы, ажырату, тазарту бағана, хемосорбциялық тазалау, массаалмасу, ауқымды әсері, шоғырлануы.

Сведения об авторах:

Сахметова Гульмира Едиловна - PhD докторант по специальности технологические машины и оборудование. Южно-Казахстанского государственного университета им. М. Ауэзова, Республика Казахстан г. Шымкент;

Бренер Арнольд Михайлович - д.т.н., профессор. Южно-Казахстанского государственного университета им. М. Ауэзова, Республика Казахстан г.Шымкент;

Балабеков Оразалы Сатимбекович - д.т.н., Академик НАН РК. Южно-Казахстанского государственного педагогического института, Республика Казахстан г. Шымкент