

**Д.т.н. Ескенди́ров М.З., д.т.н. Волне́нко А.А., Хусанов Ж.Е.,
Шакирова А.Б.**

*Южно-Казахстанский государственный университет им. М.Ауезова,
Казахстан*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ ГАЗОВ В АППАРАТЕ С РЕГУЛЯРНОЙ ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ

Массообмен и влияние структуры потоков на интенсивность процессов абсорбции в аппаратах с регулярной подвижной насадкой (РПН) достаточно хорошо изучены в трудах академика Балабекова О.С. [1] с сотрудниками [2]. В перечисленных работах глубоко исследовано влияние режимных и конструктивных параметров на интенсивность процесса абсорбции. Не смотря на это, и на достаточно широкое распространение аппаратов с РПН в промышленности, до настоящего времени отсутствовали надежные математические модели и алгоритмы расчета аппаратов с РПН, которые учитывали бы полидисперсный состав капельной составляющей поверхности контакта фаз (ПКФ).

Нами предлагается подход, учитывающий полидисперсный состав капель в межэлементном пространстве насадки. Алгоритм процесса моделирования и расчета выглядит следующим образом:

- расчет параметров функции плотности распределения капель по размерам с учетом выбранного типа элементов насадки;
- расчет процесса тепломассообмена газ – жидкость с учетом фракционного состава капель;
- расчет усредненных значений параметров жидкой фазы (температура, концентрация поглощенного компонента) на выходе из зоны абсорбции.

При разработке математической модели взаимодействия жидкой капли с газовой фазой будем базироваться на уравнениях сохранения импульса, массы и энергии при следующих допущениях:

- балансовые уравнения движения единичной капли учитывают только силы тяготения, сопротивления газовой среды и реактивной силы;
- циркуляционные течения в единичной капле не учитываются.

Математическая модель процесса абсорбции в зоне регулярной подвижной насадки имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dG}{dz} = 6 \cdot K_M S_K (X^* - X) \frac{M_{н.в.}}{U_z} \frac{m_{в.к.}}{d_K}; \\ \frac{dc}{dz} = 6 \cdot \frac{K_M}{d_K} \frac{(X^* - X)}{(1 - X)}; \\ \frac{dT_K}{dz} = 6 \cdot \frac{K_T}{d_K} \frac{(X^* - X)}{X} \frac{Q_{аб.}}{c_{рж}} \frac{m_{в.к.}}{U_z} - \frac{\alpha_T \pi d_K^2 (T_K - T_z)}{U_z \cdot c_{рж} \cdot X} - \frac{T_K}{X} \frac{dX}{dz}; \\ Q_{аб.} = m_{в.к.} c_{рж} T_z + \Delta H; \\ \frac{dU_x}{dz} = - \frac{F_{cx}}{m_K U_z} - \frac{U_x}{m_K} \frac{dm_K}{dz}; \\ \frac{dU_z}{dz} = \frac{g}{U_z} - \frac{F_{cz}}{m_K U_z} - \frac{U_z}{m_K} \frac{dm_K}{dz}; \\ \frac{dx}{dz} = \frac{U_x}{U_z}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Начальные условия для системы уравнений (1) запишутся следующим образом

$$X = X_0; \quad m = m_0; \quad T(z_0) = T_0; \quad U_x = U_0 \cos \gamma; \quad U_z = -U_0 \cos \gamma. \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dz} = 0; \quad \text{при } z = 0;$$

где γ - угол между вектором скорости капли и горизонтальной осью; U_0 - начальная скорость капли.

В качестве элементов насадки в зоне с РПН предлагается использовать пластины, как наиболее технологичный тип элементов, как в изготовлении, так и в монтаже [3]. Регулярное расположение элементов насадки в контактной зоне обеспечивает максимальную равномерность распределения жидкости по сечению аппарата. Средний диаметр капель можно определить, воспользовавшись следующей формулой [4]:

$$\bar{d}_k = 7,27 \left(\frac{\sigma^3 \cdot \delta^2}{\rho_{ж} \cdot \rho_2^2 \cdot W_2^6} \right)^{1/5}. \quad (3)$$

Здесь δ - толщина пленки на пластине.

Одной из важнейших характеристик практически любого газокапельного потока является плотность распределения капель по размерам, которое оказывает существенное, а в некоторых случаях и доминирующее влияние на эффективность процессов теплообмена. В работе [5], используя методы статистической физики и базируясь на принципе максимума энтропии закрытой макросистемы, предложено уравнение, позволяющее найти вид функции плотности распределения капель по размерам в аппаратах с РПН:

$$f(d_k) = 1,89 \left(\frac{d_k}{\bar{d}_k} \right)^3 \exp \left[-0,7 \left(\frac{d_k}{\bar{d}_k} \right)^3 \right], \quad (4)$$

где d_k – текущий диаметр капли.

Течение жидкой фазы в объеме насадки характеризуется процессами последовательного дробления на капли и их коалесценции [2,3]. При этом процесс дробления начинается с разрушения пленочного течения на периферии пластины с образованием струйно-капельного течения. Процесс же коалесценции капель происходит на нижележащем ряде пластин с образованием пленочного течения по поверхности пластин. Исходя из этого механизма течения жидкости, можно принять в качестве начальной скорости капли – скорость пленки.

При больших нагрузках по жидкости толщину и скорость пленки на пластине определяют по формулам:

$$\delta_{пл.} = 0,5 \left(\frac{\nu \cdot u_{ж}}{\mu_p \sqrt{g}} \right)^{2/3}; \quad (5)$$

$$u_{пл.} = \sqrt{2\delta_{пл.}g}. \quad (6)$$

Здесь v - сторона квадратной пластины; $\mu_p = 0,32$ - коэффициент расхода; $u_{ж}$ - истинная скорость жидкости.

Очевидно, что толщина и скорость пленки зависит от периметра слива ($P=4 \cdot v$ – квадратная пластина). Следовательно, при прочих равных условиях, изменение размера капель можно добиться изменением толщины пленки, которая уменьшается с увеличением периметра слива. Так периметр пластин с волнообразными и зигзагообразными краями увеличивается в разы в сравнении с периметром пластин с ровными краями.

Влияние же первоначального размера капли на интенсивность процесса абсорбции значительно (рисунок 1): чем меньше размер капли, тем выше общая поверхность контакта фаз и концентрация поглощаемого компонента в ней.

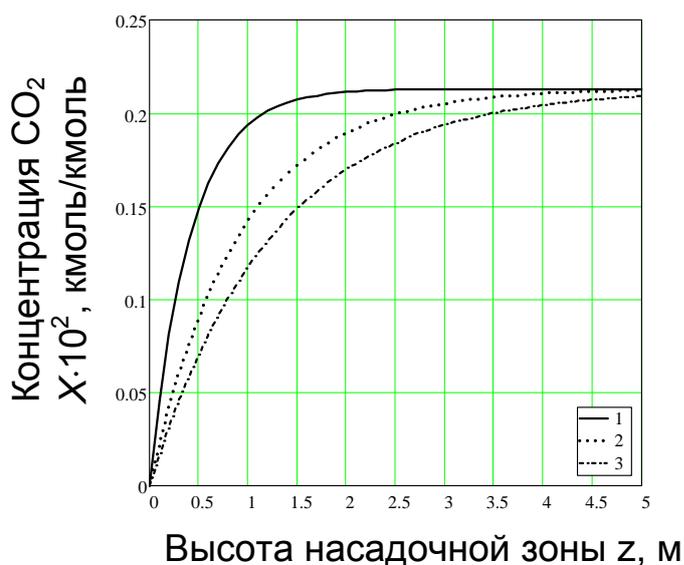
Проинтегрировав систему дифференциальных уравнений (1) для N фракций при заданной начальной температуре газовой смеси, пересчитывается температура газовой фазы. Далее, в уравнениях модели температура газовой фазы корректируется, и расчет повторяется до тех пор, пока разница значений температуры на соседних итерациях не достигнет достаточно малой величины. Расчет прекращается, когда концентрация поглощаемого газа соответствует заданной или концентрации насыщения, а температура жидкости действительной для данного установившегося режима.

Результаты расчетов, полученные для различных фракций капель, усредняются с учетом их полидисперсности. Для нахождения концентрации поглощаемого компонента в кубовой жидкости необходимо воспользоваться интегральной зависимостью:

$$X = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} X(d_k) f(d_k) d(d_k), \quad (7)$$

в которой $X(d_k)$ – зависимость концентрации поглощаемого компонента в капле от размера капель.

Для случая изотермической абсорбции (под давлением) двуокиси углерода (CO_2) водой на рисунке 1 представлен расчетный профиль концентрации в жидкой фазе по высоте контактной зоны с РПН при различных конфигурациях краев пластин.



Конфигурация краев пластин:

1 – зигзагообразные; 2 – волнообразные; 3 – прямые

Состав газовой смеси (% об.): CO_2 – 30,2; CO – 4; H_2 – 48; N_2 – 17,8.

$W_r=2$ м/с при 293°K и $0,1$ МПа; $P=1,6$ МПа; Вода: $L=40$ $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$; $X_0=0$;

$X^*=0,284 \cdot 10^{-2}$ кмоль/кмоль; $T_0=298^\circ\text{K}$.

Рис.1. Расчетный профиль концентрации двуокиси углерода (CO_2) в жидкой фазе по высоте контактной зоны с РПН при различных конфигурациях краев пластин

Таким образом, базируясь на балансовых уравнениях сохранения массы, количества движения и энергии для жидкой фазы и функции плотности распределения капель по размерам разработана математическая модель процесса абсорбции, учитывающая влияние добавочного растворенного компонента на интенсивность массообмена.

Список использованных источников:

1. Балабеков О.С. Гидродинамика, массообмен и пылеулавливание при противоточных и прямоточных двухфазных капельных и пленочных течениях в слое подвижной насадки: дис. ...докт. техн. наук / О.С. Балабеков. – М., 1985. – 430 с.
2. Бекибаев Н.С. Гидродинамика и массообмен в аппарате с регулярной подвижной пластинчатой насадкой: дис. ...канд.техн. наук / Н.С. Бекибаев. – Минск, 1987. – 220 с.
3. Ескендиров М.З. Системно-поэлементное моделирование процессов коагуляции и осаждения аэрозолей в прямоточных многофазных потоках организованной вихревой структуры: дис. ...докт. техн. наук / М.З. Ескендиров. – Шымкент, 2005. – 300 с.
4. Очистка газов в производстве фосфора и фосфорных удобрений / [Тарат Э.Я., Воробьев О.Г., Балабеков О.С. и др.]. – Л.:Химия, 1979. – 208 с.
5. Ескендиров М.З. Распределение дисперсной фазы в турбулентных газокapельных потоках / М.З. Ескендиров // Доклады НАН РК. – 2004. – №1. – С. 86-89.