УДК 697.942.2.001.24

С.Н. ОСИПОВ, д-р техн.наук,
Т.И. РАБЦЕВИЧ (БПИ)

О ТЕОРИИ РАСЧЕТА КАПЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ

В связи с необходимостью очистки вентиляционных выбросов промышленных предприятий, а также получения регулируемых газовых сред с определенным уровнем CO_2 для длительного хранения плодово-ягодной продукции, появилась потребность в совершенствовании теории расчета очистных сооружений и устройств.

Значительная часть вредных примесей приходится на вентиляционные выбросы гальванических цехов. Эти примеси отличает хорошая растворимость в воде, что дает возможность использовать для очистки воду или композиции на ее основе.

Применяемые в химической технологии методы расчета нестационарного капельного массообмена в абсорбционных аппаратах [1] носят эмпирический характер. Поэтому разработка приемлемой математической модели массообмена капли с потоком газов позволила бы уточнить методику расчета и избежать необходимости сооружения и испытания полупромышленных установок.

Рассмотрим некоторые особенности процесса абсорбции паров и газов водой на примере углекислого газа. Концентрация любого растворенного в воде газа стремится прийти в соответствие с парциальным давлением этого же газа у поверхности воды. В данном случае в первом приближении выполняется закон Генри $m = Ap$, где m – масса растворенного газа; A – коэффициент объемной абсорбции газа, зависящий от природы газа, жидкости и температуры; p – парциальное давление газа у поверхности воды.

Часто растворяемый газ химически взаимодействует с жидкостью. В этом случае общее растворенное количество газа составляет $m + q$ (q – количество газа, поглощаемого из воздушного потока за счет химических реакций).

Для дистиллированной воды значение q мало [2], и для CO_2 его можно не учитывать. Действительная эффективность очистки, очевидно, будет выше.

Аналогично теплообмену абсорбция является сложным процессом, состоящим из переноса вещества в пределах каждой из фаз и через границу раздела фаз.

Скорость сорбции газа через поверхность раздела фаз определяется градиентом химического потенциала $d\mu$, соответствующим градиенту объемной концентрации dc/dz, и сопротивлением процессу диффузии на границе газ–жидкость в соответствии с формулой $dG/dt\ dF = -k dc/dz$, где G – массовый расход газа через поверхность F за время t; k – коэффициент массопередачи, зависящий от гидравлических, геометрических и физико-химических факторов [1]. Знак минус показывает, что абсорбция происходит в направлении уменьшения концентрации, т.е. градиент dc/dz – отрицательная величина.

Внутри капли процесс абсорбции газа на основании второго закона Фика можно описать аналогично процессу теплообмена, для которого получены решения и имеются необходимые расчетные номограммы [3]:

$$D/r^2 \cdot \partial/\partial r\ (r^2 \cdot \partial c/\partial r) = \partial c/\partial t, \qquad (1)$$

где D – коэффициент диффузии газа в жидкости; r – текущий радиус капли; t – время протекания процесса диффузии.

Начальные и граничные условия необходимо выбирать с учетом параметров процесса. При отсутствии учета коэффициента переходного сопротивления сорбции в качестве краевых условий можно принять

$$c(r, 0) = 0;\ c(R, t) = c_0;\ \partial c/dr\ (0, t) = 0.$$

Решение задачи получено авторами [3] в виде

$$\bar{c} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\eta} \sin(\mu_n \eta) \exp(-\mu_n^2 F_{0_1});$$

$$\bar{c}_{cp} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 F_{0_1}), \qquad (2)$$

где $\bar{c}$ и $\bar{c}_{cp}$ – параметры концентрации и средней концентрации; $c = c_0 \cdot \bar{c}$; $c_{cp} = c_0 \cdot \bar{c}_{cp}$; $\mu_n = \pi n$; $A_n = (-1)^{n+2} \cdot \frac{2}{\mu_n}$; $B_n = \frac{6}{\mu_n^2}$; $F_{01} = \frac{Dt}{R^2}$; $\eta = \frac{r}{R}$.

Номограмма для определения $\bar{c}_{cp}$ при $D_{CO_2} = 1{,}77 \cdot 10^{-9}$ м^2/с [4] приведена на рис. 1.

Если учесть переходное сопротивление поверхности капли и задать поток газа на границе газ–жидкость, то граничные и начальные условия можно записать в виде

$$K \frac{\partial c}{\partial r}(R, t) = -D(c_0 - c_{r=R});\quad \frac{\partial c}{\partial r}(0, t) = 0;\ c(r, 0) = 0.$$

Решение получено в виде [3]:

$$\bar{c} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n \eta} \sin(\mu_n \eta) \exp(-\mu_n^2 F_{01});$$

$$\bar{c}_{cp} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 F_{01}), \qquad (3)$$

где $\operatorname{tg} \mu_n = -\frac{1}{Bi_1 - 1} \mu_n$; $A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi_1 \sqrt{(Bi_1 - 1)^2 - \mu_n^2}}{\mu_n^2 + Bi_1^2 - Bi_1}$;

$$B_n = \frac{6 \cdot Bi_1^2}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + Bi_1^2 + Bi_1)};\quad Bi_1 = \frac{DR}{K}.$$

При сравнении решений (3) и (2) выясняется, что (2) имеет одну задаваемую численную величину D, а (3) две – D и K. Поэтому для приближенных инженерных расчетов удобнее определить условные значения $D_у$ (по результатам достаточно простых экспериментов по суммарному эффекту). Значения $D_у$, возможно, отличны от значения D и включают, кроме молекулярной диффузии, эффект увеличения поглощения газа за счет химических реакций и уменьшения интенсивности поглощения за счет газового барьера у поверхности капли.

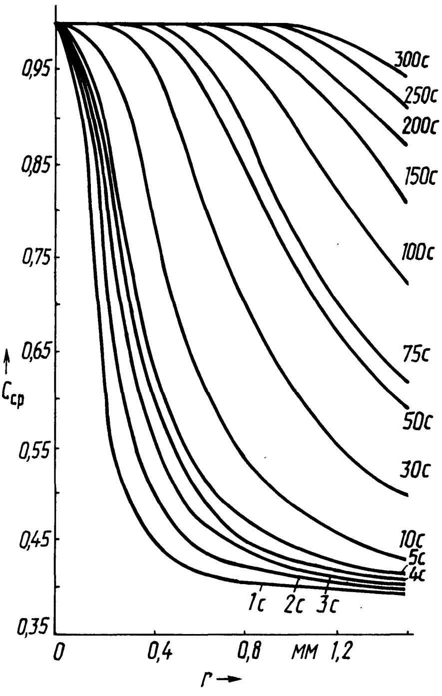

Рис. 1. Номограмма для определения средней концентрации $\bar{c}_{ср}$ в зависимости от радиуса капли.

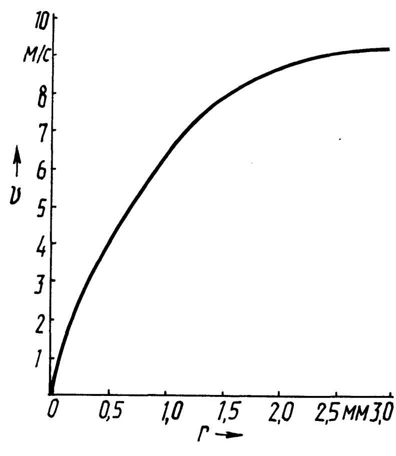

Рис. 2. Зависимость скорости витания капель воды от радиуса.

Более строгая постановка проблемы заключается в решении сопряженной задачи двухслойного шара, в котором внешний слой играет роль газового барьера, эквивалентного сопротивлению газового перехода поверхностей жидкости и газа.

Рассмотрим процесс очистки, происходящий при падении капель воды, желательно монодисперсных, в восходящем потоке вентиляционных выбросов. В соответствии с законом Стокса необходимо определить средний диаметр и время падения капель.

Как показано в работе [5], размеры водяных капель $R_{вит}$, зависят от скорости витания в соответствии с кривой, приведенной на рис. 2. Размер капли для падения должен быть больше, чем для витания, а время падения капли с радиусом $R > R_{вит}$ с учетом разгона на начальном участке может быть рассчитано по уравнению

$$t = \frac{2R^2 \rho}{9\nu} + \frac{h - \dfrac{2R^3 \rho v_s}{9\nu}}{v_s}, \qquad (4)$$

где v_s – стационарная скорость падения; ρ – плотность воды; ν – вязкость воздуха; h – высота падения; t – время падения капли.

В очищаемом вертикальном потоке происходит изменение концентрации от c_0 внизу до $c_{пдв}$ по окончании зоны очистки вверху. Будем считать, что изменение концентрации – линейная функция времени. В такой постановке начальные и граничные условия уравнения (1) принимают вид $c(r,0) = 0$; $c(R,t) = bt$; $\dfrac{\partial c}{\partial t}(r,0) = 0$.

Решение для таких граничных условий получено в виде [3] :

$$\bar{c} = F_{01} + \frac{\eta^2}{6} - \frac{1}{6} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(\mu_n \eta) \exp(-\mu_n^2 F_{01});$$

$$\bar{c}_{ср} = F_{01} - \frac{1}{15} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{\mu_n^2} \exp(-\mu_n^2 F_{01});$$

$$c = \bar{c}\frac{bR^2}{D}; \quad c_{ср} = \bar{c}_{ср}\frac{bR^2}{D}.$$

В случае учета переходного сопротивления поверхности капли краевые условия принимают вид

$$K\frac{\partial c}{\partial r}(R,t) = -D(c_0 - c_{r=R}); \; c_0 = bt; \; \frac{\partial c}{\partial r}(0,t) = 0; \; c(r,0) = 0.$$

Решение [3] преобразовано в

$$\bar{c} = F_{01} + \frac{\eta^2}{6} - \frac{1}{3Bi_1} - \frac{1}{6} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^3 \eta} \sin(\mu_n \eta) \times$$

$$\times \exp(-\mu_n^2 F_{01});$$

$$\bar{c}_{ср} = F_{01} - \frac{1}{3Bi_1} - \frac{1}{15} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{\mu_n^2} \exp(-\mu_n^2 F_{01}),$$

где $$\operatorname{tg}\mu_n = -\frac{1}{Bi_1 - 1}\mu_n;\ A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi_1\sqrt{(Bi_1-1)^2 + \mu_n^2}}{\mu_n^2 + Bi_1^2 - Bi_1};$$

$$B_n = \frac{6Bi_1^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi_1^2 - Bi_1)}.$$

Ниже приведен пример расчета по изложенной нами методике.

Пример. Определить необходимое количество и высоту подачи воды для очистки выбросов вентиляционной шахты № 1 Минского мотовелозавода от хрома шестивалентного при следующих исходных данных: высота шахты 30 м; расход по воздуху 90,55 $м^3/с$; скорость воздушного потока 4,5 м/с; коэффициент абсорбции 16,74 г/($м^3 \cdot$Па); парциальное давление хрома шестивалентного $1{,}21 \cdot 10^{-7}$ Па; его удельная масса 14,8 мг/с.

Решение. По скорости воздушного потока (рис. 2) определяем необходимый средний радиус капель воды R = 0,58 мм. Округляя, получаем R = 0,6 мм. В соответствии с заданной концентрацией, в 1 $м^3$ воды при нормальном давлении можно растворить $m = 16{,}74 \cdot 100000 \cdot 1{,}27 \cdot 10^{-7} = 214$ $мг/м^3$. Отсюда находим необходимое минимальное количество воды: $L_{мин} = 14{,}8 : 214 = 0{,}069$ $м^3/с$. По номограмме рис. 1 определяем, что для радиуса капли R = = 0,6 мм время полного насыщения составит 135 с. Из уравнения (4) по времени t = 135 с рассчитаем высоту падения капли $h' = (135 - 4{,}37) \cdot 0{,}05 + 7{,}31 = 6{,}53 + 7{,}31 = 13{,}84$ м.

Итак, для очистки вентиляционных выбросов от хрома шестивалентного в шахту № 1 ММВЗ следует подавать 0,069 $м^3/с$ воды с высоты не менее 13,84 м.

Необходимо провести экспериментальные исследования по определению условного коэффициента диффузии с учетом сложных физико-химических процессов, протекающих на поверхности и в объеме капли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М., 1976. – 655 с. 2. Сулла М.Б., Соколов Э.М., Харламов В.А. Поглощение CO_2 водой. – Тула, 1969, с. 82–96. 3. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л., 1976. – 352 с. 4. Пасманик М.М., Спасс-Тисовский Б.А., Якименко Л.М. Справочник. – М., 1966. – 254 с. 5. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М., 1955. – 378 с.