Все полученные данные являются неотъемлемой частью общей картины физико-химических и механических процессов, протекающих в прессовальных и теплогенерирующих установках при воздействии температурного фактора, и вносят существенный вклад в понимание этих процессов.

Литература

1. Концепция охраны и рационального использования торфяных болот России / под общ. ред. чл.-корр. РАСХН Л.И. Инишевой. – Томск, 2005.

2. *Лиштван, И.И.* Физика и химия торфа / [И.И. Лиштван и др.]. – М., 1989.

3. *Любов, В.К.* Повышение эффективности энергетического использования биотоплив / В.К. Любов, С.В. Любова. – Архангельск, 2010.

4. Сжигание кускового и фрезерного торфа в топках промышленных установок. – Мн., 1952.

5. *Солопов, С.Г.* Торфяные машины и комплесы / С.Г. Солопов, Л.О. Горцакалян, Л.Н. Самсонов. – М., 1973.

УДК 621.1.016(035.5)

Н.Н. Синицын, К.С. Пронин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ АММИАКА КАПЛЯМИ ВОДЫ

В статье представлены результаты исследования диффузии аммиака в капле воды при малых диффузионных числах Фурье. Получено уравнение коэффициента адаптации для уравнения диффузии аммиака в капле воды.

Массоотдача, концентрация, аммиак, диффузия, коэффициент адаптации.

The paper presents the results of studying the diffusion of ammonia in the drop of water with small diffusion Fourier numbers. The equation of adaptation coefficient for the diffusion equation in the drop of ammonia water has been obtained.

Mass transfer, concentration, ammonia, diffusion, adaptation coefficient.

Оценка траектории и скорости движения капель воды необходима при расчете абсорбции аммиака, оптимизации аэродинамики полых абсорберов с целью уменьшения брызгоуноса. Для определения количества поглощенного аммиака каплей необходимо рассчитать поля концентраций аммиака в капле воды с учетом химических реакций. Допуская аналогию между процессами тепло- и массоотдачи, можно определить концентрацию по сечению капли при малых значениях диффузионного числа Фурье Fo'.

В жидкой фазе значения Fo' по порядку величины в 10000 раз меньше, чем в газовой фазе (из-за соответствующего различия коэффициентов диффузии $D_Ж$ и $D_Г$), и в этом случае решение уравнения диффузии [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \cdot \left[\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right], \qquad (1)$$

проводим при граничных условиях первого рода. C_P = const – концентрация у границы раздела фаз принимается постоянной.

При численном решении задачи разностным методом решение может быть получено лишь в некотором конечном множестве точек, называемых сеткой. Процедура численного решения начинается с замены дифференциального уравнения его конечно-разностным аналогом. Для решения уравнения (1) используется неявный конечно-разностный метод.

Расчет распределения концентрации аммиака по сечению капли представлен на рис. 1 при физической абсорбции.

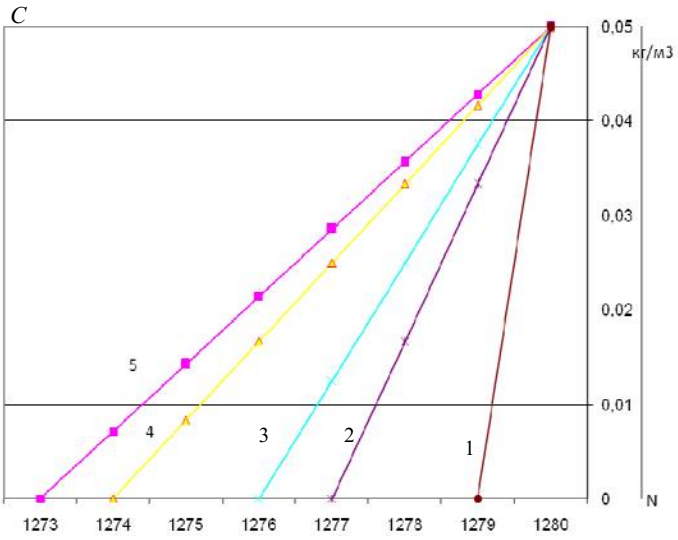


Рис. 1. Распределение концентраций по сечению капли в различные моменты времени:
1 – Fo = 1,056 · 10^{-6}; 2 – Fo = 1,232 · 10^{-6};
3 – Fo = 2,112 · 10^{-6}; 4 – Fo = 2,992 · 10^{-6};
5 – Fo = 4,048 · 10^{-6}

Диаметр капли 2 · 10^{-3} м. Число Fo рассчитывалось по формуле Fo = $D_Ж \cdot \tau / R_0$, где $D_Ж$ – коэффициент диффузии аммиака в воде, м^2/с; τ – время, с; R_0 – радиус капли, м; N – число узлов расчетной сетки при граничных условиях первого рода.

Концентрация на поверхности равна C = = 0,05 кг/м^3.

При малых значениях критерия $Fo_ж'$ ($Fo_ж'$ < < 0,0293) [1] коэффициент массоотдачи можно рассчитывать по формуле:

$$Nu_ж' = \frac{1{,}13}{\sqrt{Fo_ж'}} = \frac{1{,}13}{\sqrt{\frac{D_ж \cdot \tau}{d^2}}}, \qquad (2)$$

где

$$Nu_ж' = \frac{\beta_ж \cdot d}{D_ж} \quad и \quad Fo_ж' = \frac{D_ж \cdot \tau}{d^2}$$

рассчитываются по диаметру капли d и времени движения капли τ.

Уравнение (2) подтверждается опытами [3], а также [4], по абсорбции CO_2 водой и растворами сахара. Указанные уравнения приведены лишь для капель малого диаметра, когда можно пренебречь внутренней циркуляцией. При возникновении внутренней циркуляции коэффициент массоотдачи в жидкой фазе повышается в 2,5 раза и более по сравнению с теоритическими формулами. Повышение коэффициента массоотдачи происходит также вследствие деформации капель.

Граничные условия у поверхности раздела фаз имеют вид:

$$\beta_ж \cdot (C_P - C_0) = D_ж \cdot (\frac{\partial C}{\partial r})_{r=R_0}, \qquad (3)$$

где $C_p - C_0$ – движущая сила; C_p и C_0 – концентрация компонента у границы раздела фаз и в глубине фазы; C – концентрация компонента; r и R_0 – текущий радиус и радиус капли; $\beta_ж$ – коэффициент массоотдачи; $D_ж$ – коэффициент диффузии аммиака в жидкости.

Расчет коэффициентов массоотдачи по математической модели [2] и по формуле (3) представлен на рис. 2.

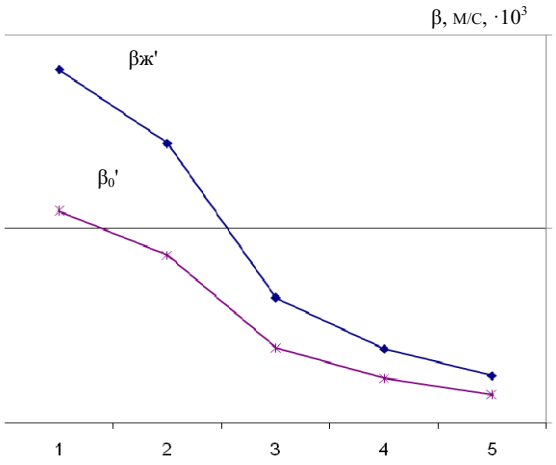


Рис. 2. Взаимосвязь коэффициентов $\beta ж'$ и β_0' и числа $Fo_ж'$

Из рис. 2 видно, что значения коэффициента массоотдачи $\beta_ж'$ приблизительно в два раза больше значений коэффициента массоотдачи β_0'.

Коэффициент массоотдачи $\beta_ж'$, рассчитывается с учетом уравнения (2). Коэффициент β_0' рассчитывается по формуле (3):

$$\beta_0' = \frac{D_ж \cdot (C_N - C_{N-1})}{\Delta r \cdot (C_N - C_0)}, \qquad (3)$$

где C_N и C_{N-1} – значения концентрации в момент времени τ в узлах N и $N-1$ расчетной сетки; Δr – шаг по координате расчетной сетки.

Зависимость $\beta_ж'$ (рис. 2) аппроксимирована уравнением вида (δ = 0,03 %):

$$\beta_ж' = 9{,}6 \cdot 10^{-7} \cdot Fo_ж'^{-0{,}5} \cdot \exp(3289{,}48 \cdot Fo_ж'). \qquad (4)$$

Зависимость β_0' (рис. 2) аппроксимирована уравнением вида (δ = 0,084 %):

$$\beta_0' = 5{,}28 \cdot 10^{-7} \cdot Fo_ж'^{-0{,}5} \cdot \exp(-15206{,}36 \cdot Fo_ж'). \qquad (5)$$

Анализ расчетных зависимостей для физической абсорбции (5) и зависимости с учетом химической абсорбции (4) показывает, что в уравнение (1) необходимо ввести коэффициент адаптации K_a.

Зависимость K_a от $Fo_ж'$ имеет вид:

$$K_a = 1{,}774 \cdot 10^{33} \cdot Fo_ж'^{5{,}0259} \cdot \exp(-1{,}044 \cdot 10^7 \cdot Fo_ж')$$

при $Fo_ж' < 5{,}28 \cdot 10^{-7}$ (δ = 0,5 %).

$$K_a = 18581{,}33 \cdot Fo_ж'^{0{,}76} \cdot \exp(-723606{,}6 \cdot Fo_ж')$$

при $Fo_ж' \geq 5{,}28 \cdot 10^{-7}$ (δ = 0,05 %).

Здесь в формулах число $Fo_ж'$ изменяется от $2{,}64 \cdot 10^{-7}$ до 0,001.

Для расчета диффузии аммиака в капле с учетом химической реакции уравнение (1) дополняется коэффициентом K_a и имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_ж \cdot K_a \cdot \left[\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r}\right] \qquad (1')$$

Таким образом, с помощью уравнения (1') можно рассчитать распределение концентрации аммиака в капле воды по радиусу с учетом химической реакции.

На рис. 3 представлено распределение концентрации аммиака по радиусу капли воды с учетом химической реакции.

Из сравнения рис. 2 и 3 видно, что распределения концентрации при физической абсорбции и с учетом химической реакции существенно изменяются.

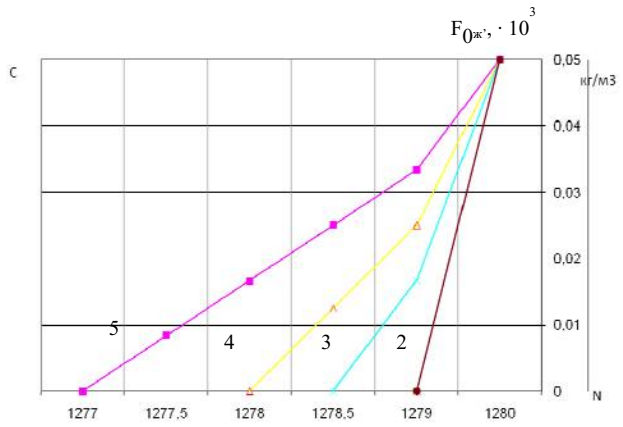


Рис. 3. Распределение концентраций аммиака по сечению капли с учетом химической реакции:
2 – $Fo_{ж}' = 3{,}08 \cdot 10^{-7}$; 3 – $Fo_{ж}' = 5{,}28 \cdot 10^{-7}$;
4 – $Fo_{ж}' = 7{,}48 \cdot 10^{-7}$; 5 – $Fo_{ж}' = 1{,}012 \cdot 10^{-6}$

Разность средних значений концентраций аммиака подсчитана для каждого узла расчетной сетки в момент времени τ по формулам (1) и (1'), что дает возможность оценить количество вещества, прореагировавшего в каждом узле расчетной сетки, и количества вещества, поглощенного каплей в каждый момент времени τ.

В результате проведенного исследования разработана математическая модель расчета поля концентраций аммиака в капле воды при ее движении в газовом потоке, содержащем аммиак.

Литература

1. *Рамм, В.М.* Абсорбция газов / В.М. Рамм. – М., 1976.

2. *Синицын, Н.Н.* Тепломассоотдача при движении капли воды в газовом потоке, содержащем аммиак / Н.Н. Синицын, К.С. Пронин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 4. – Т. 2. – С. 26 – 29.

3. *Bosworth R.C.L., Austr*. Chem. Inst. J. – 1946. – V. 13. – P. 53 – 59.

4. *Guyer A., Tobler B., Farmer R.H., Chem*. Fabr. – 1934. – Bd. 7. – № 29/30. – S. 265 – 269, 1936, Bd. 9. – № 1/2. – S. 5 – 7.