УДК 621.1.016(035.5)

Н.Н. Синицын, К.С. Пронин

ТЕПЛОМАССООТДАЧА ПРИ ДВИЖЕНИИ КАПЛИ ВОДЫ В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ, СОДЕРЖАЩЕМ АММИАК

В статье предложено математическое описание системы дифференциальных уравнений тепло- и массоотдачи при движении одиночных капель воды в газовом потоке, содержащем аммиак. Система содержит уравнения движения точки переменной массы, уравнения диффузии аммиака в воде, уравнения прогрева капли воды за счет учета внутренних источников теплоты, передаваемой одиночной капле за счет конвекции.

Теплоотдача, массоотдача, траектория движения, газовый поток, концентрация, внутренние источники теплоты, аэродинамическое сопротивление одиночных частиц, аммиак, диффузия, тестирование.

The paper presents a mathematical description of the system of differential equations of heat and mass transfer during the motion of single drops of water in a gas stream containing ammonia. The system contains the equations of motion of the point of varable mass, the equation of the diffusion of ammonia in water, the equations of warming-up of water drops by taking into account internal heat sources transmitted to a single dropl by convection.

Heat transfer, mass transfer, trajectory of motion, gas flow, concentration, internal heat sources, aerodynamic resistance of single particles, ammonia, diffusion, testing.

Полые (форсуночные) распыливающие абсорберы представляют собой колонны или камеры, в которых движется газ, встречающий на своем пути жидкость, распыляемую на капли при помощи форсунок (распылителей). Газ движется обычно снизу вверх, а жидкость подается через расположенные в верхней части колонны распылители с направлением факела распыла сверху вниз или под некоторым углом к горизонтальной плоскости. При распылении жидкостей форсунками получается полидисперсный распыл, состоящий из капель различного диаметра. Распределение капель по диаметру имеет вероятностный характер и описывается кривой распределения, которая строится по опытным данным. Для практических целей обычно пользуются средним объемно-поверхностным диаметром, определяемым по формуле [6]:

$$\bar{d} = \frac{\sum d^3 \cdot n}{\sum d^2 \cdot n}, \qquad (1)$$

где n – число капель диаметром d.

Поверхность контакта фаз в полом абсорбере пропорциональна плотности орошения, поэтому при низких плотностях орошения эти абсорберы работают неудовлетворительно. Во избежание уноса распыленной жидкости с газом применяют низкие скорости газа, что приводит к малоэффективной работе абсорбера. В скоростных полых абсорберах, работающих при высоких скоростях газа и высоких плотностях орошения, ввиду большого брызгоуноса газ после абсорбера пропускают через выносные циклоны или через установленный в корпусе аппарата жалюзийный брызгоотделитель. Полые распыливающие абсорберы отличаются простотой конструкции и низкой стоимостью; они обладают малым гидравлическим сопротивлением и могут применяться при сильно загрязненных газах.

Основной недостаток полых абсорберов – невысокая эффективность, обусловленная перемешиванием газа и плохим заполнением объема факелом распыленной жидкости. Оценка траектории и скорости движения капель воды необходима при расчетах абсорбции аммиака, оптимизации аэродинамики полых абсорберов с целью уменьшения брызгоуноса.

Следующей важной задачей, тесно связанной с указанной, является определение относительной скорости движения частиц в потоке, так как она определяет интенсивность тепломассоотдачи капель воды в потоке. Задача о движении частицы жидкости является достаточно сложной, и в силу многообразия воздействующих факторов обобщенного решения ее пока не существует. Имеющиеся решения этой задачи обычно учитывают отдельные наиболее существенные факторы.

В общем случае движение одиночной частицы в газовом потоке может быть описано уравнением [5], [8]:

$$m \cdot \frac{d\vec{V}}{d\tau} = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{P}_i, \qquad (2)$$

где m – масса частицы, движущейся со скоростью $\vec{V}$. Суммарное воздействие всех сил $\vec{P}_i$, действующих на частицу, может быть ограничено главными силами: лобового сопротивления частицы потоку и весом.

Сила лобового аэродинамического сопротивления $\vec{P}_c$ может быть представлена в виде:

$$\vec{P}_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot f \cdot \rho_\Gamma \cdot \left(\vec{W} - \vec{V}\right) \cdot \left|\vec{W} - \vec{V}\right|, \qquad (3)$$

а вес:

$$\vec{P}_\text{В} = m \cdot \vec{g}, \qquad (4)$$

где $m = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \rho_К}{6}$ – масса частицы шаровой формы; $C = A/Re^n$ – коэффициент сопротивления частицы; $f = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – площадь миделева сечения частицы для шара; $\rho_К$ – плотность частицы; $\vec{W}$ – скорость газового потока; $\vec{g}$ – вектор ускорения свободного падения; $\mathrm{Re} = \frac{W_{отн.} \cdot d}{\nu}$ – число Рейнольдса; ν – коэффициент кинематической вязкости.

Зависимость $C = f(Re)$ дана для шара и имеет сложный характер.

Коэффициенты A и n, входящие в выражение для C, были определены Стоксом для равномерного изотермического обтекания сферического тела потоком в области Re < 1 (область Стокса). В этой области $C = 24/Re$. Когда обтекание шаровой частицы характеризуется числом Re > 1, следует выделять области с различающейся зависимостью $C = f(Re)$:

– при $1 \le \mathrm{Re} \le 1000$ (переходная область) $C = \frac{24}{\mathrm{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}$ (формула Шелла-Клячко);

– при $2 \cdot 10^4 \le \mathrm{Re} \le 2 \cdot 10^5$ (автомодельная область) $C = 0{,}48$;

– при $\mathrm{Re} > 2 \cdot 10^6$ (закритическая область) $C = 0{,}2$.

В общем случае при известном поле скоростей потока система уравнений (2) – (4) может быть решена численно.

Результаты исследований по массоотдаче для одиночных капель можно выразить уравнением:

$$\mathrm{Nu}_D = a + b \cdot \mathrm{Re}_Г^m \cdot \mathrm{Pr}_D^n, \qquad (5)$$

где Nu_D и Pr_D – диффузионные числа Нуссельта и Прандтля; $\mathrm{Re}_Г$ – критерий Рейнольдса, вычисленный по диаметру капли и относительной скорости ее движения. Критерий Nu_D рассчитан по диаметру капли.

Фресслинг [6] на основе опытов по испарению жидких капель и твердых шаров получил: $a = 2$; $b = 0{,}552$; $m = 0{,}5$; $n = 0{,}33$ (при $\mathrm{Re}_Г = 2 \div 1000$). Опыты Ранца и Маршалла [6] по испарению жидких капель подтвердили эти значения с той лишь разницей, что $b = 0{,}6$ (при $\mathrm{Re}_Г < 200$). Вырубов [6] при поглощении аммиака фосфорной кислотой, нанесенной на твердые шары, получил: $a = 0$; $b = 0{,}6$; $m = 0{,}5$; $n = 0{,}33$ (при $\mathrm{Re}_Г = 200 \div 2500$). Опыты Джонстона и Вильямса [6] по абсорбции на одиночных каплях при поглощении аммиака серной кислотой, а также сернистого газа, сероводорода и углекислого газа раствором гидроксида натрия подтвердили уравнение (5) с коэффициентами Фресслинга; однако, при абсорбции хлороводорода раствором гидроксида натрия опытные данные лежат ниже.

Зависимость вязкости газа от температуры выражается уравнением Сезерленда [2]:

$$\mu_Г = \mu_0 \cdot \frac{T_0 + a}{T + a} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}. \qquad (6)$$

Зависимость теплопроводности газов от температуры выражается линейным уравнением [10]:

$$\lambda_Г = b + k \cdot T. \qquad (7)$$

Вязкость жидкости определяется уравнением [3]:

$$\mu_ж = \left\{ 2{,}2 \cdot 10^{-12} \cdot \left[\left(T_ж - 2{,}81 \cdot 10^2 \right) + \sqrt{8 \cdot 10^3 + \left(T_ж - 2{,}81 \cdot 10^2 \right)^2} - 1{,}2 \right] \right\}^{-1}. \qquad (8)$$

Для воды эта зависимость аппроксимирована двумя прямыми [3]:

– при $273 \le T_{ж} \le 304$ К $\mu_ж = 1{,}08 \cdot 10^{-2} - 0{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot T_ж$;

– при $304 \le T_ж \le 373$ К $\mu_ж = 2{,}56 \cdot 10^{-3} - 0{,}62 \cdot 10^{-5} \cdot T_ж$.

Для определения коэффициента диффузии в жидкости можно воспользоваться формулой, приведенной в работе [4]:

$$\frac{D_ж \cdot \mu_ж}{T_ж} = 7{,}4 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{(c \cdot M)^{0{,}5}}{V_0^{0{,}6}}, \qquad (9)$$

где c – константа, зависящая от природы жидкости (для воды $c = 2{,}6$); M – молекулярная масса сорбируемого компонента ($M_{NH3} = 17$); V_0 – удельный объем ($V_{0NH3} = 25{,}8$ см^3/моль); $D^{20}_{ж,\,H2O} = 1{,}76 \cdot 10^{-5}$ см^2/с.

Коэффициент диффузии в газе можно рассчитать по уравнению [7]:

$$D_Г = 4{,}3 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{T_I^{\frac{3}{2}}}{P \cdot \left(V_1^{\frac{1}{3}} + V_2^{\frac{1}{3}} \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}}, \qquad (10)$$

где V_1 и V_2 – удельные объемы газовой фазы и распределяемого компонента.

Общая зависимость коэффициента диффузии от температуры приведена в [7]:

$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}. \qquad (11)$$

Здесь P – общее давление, Мпа; V_1 и V_2 – мольные объемы веществ 1 и 2 в жидком состоянии при нормальной температуре кипения, см^3/моль; M_1 и M_2 – мольные массы веществ 1 и 2.

С повышением температуры коэффициент диффузии в жидкостях увеличивается и для определения D при температуре t °С можно пользоваться зависимостью [6]:

$$D = D_{20} \cdot \left[1 + \frac{0,2 \cdot \sqrt{\mu_{20}}}{\rho^{1/3}} \cdot (t - 20) \right], \qquad (12)$$

где ρ – плотность растворителя, кг/м^3; μ_{20} – вязкость растворителя, мПа·с.

Для определения коэффициента диффузии газа в растворителе (воде) при 20 °С можно использовать формулу [6]:

$$D_{20} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 4,7 \cdot \sqrt{1} \cdot \left(25,8^{\frac{1}{3}} + 18,9^{\frac{1}{3}} \right)^2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{17} + \frac{1}{18}} = 0,228 \cdot 10^{-8} \quad \text{м}^2/\text{с}. \qquad (13)$$

Обработка В.И. Муштаевым и В.М. Ульяновым обширных данных по массообмену позволила получить обобщенное уравнение для расчета коэффициента массоотдачи [2]:

$$\text{Nu}_D = 2 + 0,51 \cdot \text{Re}^{0,52} \cdot \text{Pr}_D^{0,33}. \qquad (14)$$

Средняя погрешность уравнения (14) не превышает 7 % для чисел Re в пределах 0÷70000.

Допуская аналогию между процессами тепло- и массообмена, можно принять Sh = Nu. Аналогия не является полной, так как теплообмен в значительно меньшей степени влияет на гидродинамику пограничного слоя, чем массообмен. Однако для многих практических случаев факторами, нарушающими аналогию, можно пренебречь и принять Nu = Sh, что дает основание использовать для расчета коэффициентов теплообмена критериальные зависимости, полученные при исследовании массообмена, или наоборот. Таким образом, обобщенное критериальное уравнение для расчета коэффициентов теплоотдачи будет иметь вид [2]:

$$\text{Nu} = 2 + 0,51 \cdot \text{Re}^{0,52} \cdot \text{Pr}^{0,33}, \qquad (15)$$

где $\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ – число Нуссельта; Pr – число Прандтля.

В условиях высоких температур аналогия в расчете коэффициентов тепло- и массоотдачи в значительной мере нарушается: при одних и тех же значениях критерия Рейнольдса Nu ≠ Sh и соотношения (14) и (15) не соблюдаются. Расхождение это тем больше, чем выше интенсивность сушки.

В жидкой фазе коэффициент диффузии $D_ж$ по порядку величины в 10000 раз меньше, чем в газовой фазе $D_Г$, и в этих условиях можно пользоваться уравнением для диффузии в капле [6]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_ж \cdot \left[\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right]. \qquad (16)$$

Подстановкой $B = C \cdot r$ уравнение (16) приводится к виду:

$$\frac{\partial B}{\partial \tau} = D_ж \cdot \frac{\partial^2 B}{\partial r^2}, \qquad (17)$$

с граничными условиями:

$$\begin{array}{lll} r = 0 & \tau > 0 & B = 0; \\ r = R_0 & \tau > 0 & B = R_0 \cdot C_p; \\ 0 \le r < R_0 & \tau > 0 & B = r \cdot C(r). \end{array} \qquad (18)$$

C – концентрация в момент времени τ, кг/м^3; C_p – концентрация у границы раздела фаз, принимаемая постоянной, кг/м^3; C_0 – начальная концентрация (при τ = 0), кг/м^3; $D_ж$ – коэффициент диффузии в жидкой фазе, зависящий от температуры, м^2/с; r – текущий радиус капли, м; R_0 – начальный радиус капли, м.

Тестирование решения уравнения (17) при граничных условиях (18) проводим при малых числах Фурье [5]:

$$\Theta = 1 - \frac{C - C_0}{C_p - C_0} = 1 - \frac{R_0}{r} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \left(erfC \cdot \frac{(2n-1) - \frac{r}{R_0}}{2\sqrt{F_0'}} - erfC \cdot \frac{(2n-1) + \frac{r}{R_0}}{2\sqrt{F_0'}} \right). \qquad (19)$$

Это решение пригодно при $r > 0$. Для концентрации в центре капли ($r = 0$) решение имеет вид [1]:

$$\Theta_ц = 1 - \frac{C - C_0}{C_p - C_0} = 1 - 2\sqrt{\frac{1}{\pi \cdot F_0'}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2}{4F_0'} \right], \qquad (20)$$

где $F_0' = \frac{D_ж \cdot \tau}{R_0^2}$ – диффузионный критерий Фурье, рассчитанный по размеру капли R_0.

Температурное поле капли с непрерывно действующими источниками теплоты математически записывается так:

$$\frac{\partial \left[r \cdot T(r,T) \right]}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 \left[r \cdot T(r,T) \right]}{\partial r^2} + \frac{\omega \cdot r}{C \cdot \gamma}$$

$$(\tau > 0; \quad 0 < r < R_0), \qquad (21)$$

$$T(r, 0) = T_0, \qquad (22)$$

$$\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial r} = 0, \; T(0, \tau) \neq \infty, \qquad (23)$$

$$-\frac{\partial T(R_0,\tau)}{\partial r}+\frac{\alpha}{\lambda}\cdot\left[T_C-T(R_0,\tau)\right]=0. \qquad (24)$$

Здесь R_0 – радиус капли; T_0 – начальная температура капли; $T_C > T_0$ – температура окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности капли; ω – удельная мощность источника теплоты; C – удельная теплоемкость; γ – плотность капли; a – коэффициент температуропроводности, зависящий от температуры; τ – время; r – текущий радиус капли.

Тестирование решения задачи при ω = *const* проводим по формуле [1]:

$$\theta=\frac{T_{(r,\tau)}-T_0}{T_C-T_0}=1+\frac{1}{6}\cdot P_0\cdot\left(1+\frac{2}{B_i}-\frac{r^2}{R_0^2}\right)-$$

$$-\sum_{n=1}^{\infty}\left(1+\frac{P_0}{\mu_n^2}\right)\cdot A_n\cdot\frac{R_0\cdot\sin\left(\mu_n\cdot\frac{r}{R_0}\right)}{r\cdot\mu_n}\cdot\exp\left(-\mu_n^2\cdot F_0\right), \qquad (25)$$

где $P_0=\frac{\omega\cdot R_0^2}{\lambda\cdot(T_C-T_0)}$ – критерий Померанцева; $\mathrm{Bi}=\frac{\alpha\cdot R_0}{\lambda}$ – число Био; $F_0=\frac{a\cdot\tau}{R_0^2}$ – число Фурье; A_n – начальные тепловые амплитуды, определяемые соотношением:

$$A_n=(-1)^{n+1}\cdot\frac{2\mathrm{Bi}\cdot\sqrt{\mu_n^2+(\mathrm{Bi}-1)^2}}{\mu_n^2+\mathrm{Bi}^2-\mathrm{Bi}}. \qquad (26)$$

Если $\mathrm{Bi}\to\infty$, то $\mu_n = n\cdot\pi$, $A_n = (-1)^{n+1}\cdot 2 = 2\cdot(-1)^{n+1}$.

Если Bi = 1, то

$$\mu_n = (2n-1)\cdot\pi/2,\ A_n = (-1)^{n+1}\cdot 2/\mu_n. \qquad (27)$$

При малых значениях Bi (Bi → 0) все коэффициенты $A_n \to 0$, за исключением первого ($A_1 = 1$), а $\mu_1^2 = 3\mathrm{Bi}$.

Таким образом, решение системы уравнений (2) – (27) позволяет рассчитывать траекторию движения одиночных капель в газовом потоке, содержащем аммиак, с учетом тепло- и массоотдачи.

Литература

1. *Лыков, А.В.* Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. 1967.
2. *Муштаев, В.И.* Конструирование и расчет аппаратов со взвешенным слоем / В.И. Муштаев, А.С. Тимонин, В.Я. Лебедев. – М., 1991.
3. *Пажи, Д.Г.* Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галцетов. – М., 1984.
4. *Перри, Дж.* Справочник инженера-химика / Дж. Перри. – Л., 1969. – Т. 1.
5. *Померанцев, В.В.* Основы практической теории горения / В.В. Померанцев. – Л., 1986.
6. *Рамм, В.М.* Абсорбция газов / В.М. Рамм. – М., 1976.
7. *Рид, Р.* Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Т. Шервуд. – Л., 1969. – Т. 1. – С. 98.
8. *Синицын, Н.Н.* Расчет траекторий движения капли воды с учетом фазовых переходов в системе газоочистки кислородного конвертора / Н.Н. Синицын, Л.А. Полеводова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж, 2007. – Т. 3. – № 6. – С. 160 – 164.
9. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под ред. А.А. Русакова. – М., 1975.
10. Теплофизические свойства веществ. Справочник / под ред. Н.Б. Варгафтика. – М., 1956. – С. 73.

УДК 621.78.084

М.В. Старцева, Ю.Г. Ярошенко, Ю.И. Липунов

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА КОНТРОЛИРУЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК

В статье описано устройство регулируемого охлаждения для термоупрочнения рельсовых накладок, позволяющее сделать процесс управляемым за счет получения равномерного температурного поля по разномассивным элементам (головка, шейка). Устройство прошло апробацию в стендовых условиях и внедрено в промышленность. Получены результаты по механическим свойствам, удовлетворяющие требованиям нормативной документации. Предложенный способ с успехом может заменить традиционный – закалку в баке с маслом.

Рельсовая накладка, ускоренное водяное охлаждение, термоупрочнение проката, спрейерные установки, устройство ускоренного охлаждения.

The paper describes the controlled cooling device for thermohardening of joint bar. The proposed technique can successfully replace the conventional one – oil quenching – due to making the cooling process more controlled by obtaining a uniform temperature distribution over joint bar elements with different mass such as heads and the web. The technique has been validated by a test bench experiment and implemented in the metallurgical industry. The mechanical properties have been obtained to meet the GOST 4133-73 Federal Standard.