

Обработка опытных данных, полученных для влажного пара, позволила определить новые коэффициенты в эмпирической формуле Д.А. Лабунцова.

Уравнение для расчета теплообмена при конденсации влажного пара на вертикальной трубе имеет вид

$$Re_H = \left[53 + 0,03(P_{r_H} / P_{r_{ст}})^{0,25} P_{r_H}^{0,5} (Z - 1250) \right]^{\frac{4}{3}} \quad (2)$$

В знаменателе комплексов Z и Re при этом обязательно вводится степень сухости пара.

Уравнение (2) аппроксимирует опытные данные в интервале чисел Re от 200 до 1000. Не исключена возможность, что данное уравнение может быть пригодно для расчетов теплоотдачи и при более высоких значениях критерия Рейнольдса, однако это требует подтверждения соответствующими опытными данными.

Л и т е р а т у р а

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М., 1973. 2. Лабунцов Д.А. Теплоотдача при пленочной конденсации чистых паров на вертикальных поверхностях и горизонтальных трубах. — "Теплоэнергетика", 1957, № 7. 3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, 1970.

В.А. Седнин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОРБЦИОННЫХ СИЛ НА ДВИЖЕНИЕ ТОНКОДИСПЕРСНОГО АДСОРБЕНТА

В различных отраслях промышленности широкое применение находят тонкодисперсные адсорбционные материалы. Учет влияния сорбционных сил является важным при определении характеристик гидромеханики и теплообмена потоков адсорбента.

Взаимодействие сорбционных сил проследим на примере нагрева в одномерном тепловом поле вертикального прямооточного потока "газ—твердые частицы" (рис. 1).

Рассмотрим взаимодействие частицы адсорбента с молекулами газа. Скорость адсорбции может быть выражена [1]

$$\frac{dK_s}{d\tau} = \alpha\mu - \nu, \quad (1)$$

где K_s — поверхностная концентрация молекул адсорбированного газа; α — коэффициент конденсации (отношение числа молекул, конденсирующихся на поверхности, к общему числу молекул, ударяющихся о поверхность); μ — число молекул, ударяющихся о единицу площади поверхности адсорбента в единицу времени, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; ν — число молекул, испаряющихся с единицы площади в единицу времени, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Величины μ и ν можно определить по зависимостям [1]

$$\mu = \frac{p}{(2\pi mkT)^{1/2}} \quad (2)$$

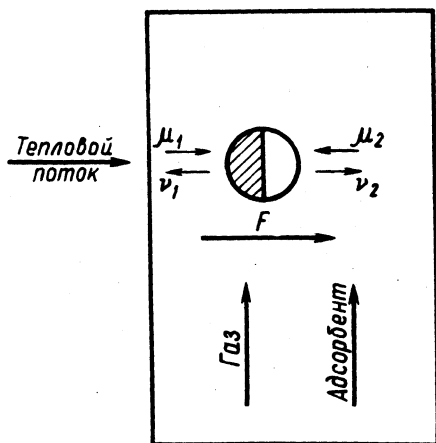


Рис. 1.

Здесь m — масса молекулы, кг; k — постоянная Больцмана, Дж/К; p — давление газа в потоке, Па

и
$$\nu = k_a \exp\left(-\frac{q}{kT}\right), \quad (3)$$

где k_a — коэффициент адсорбции, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; q — количество теплоты, которое выделяется при адсорбции одной молекулы,

Дж/л. При равновесии $\frac{dK_s}{d\tau} = 0$, следовательно,

$$\alpha\mu = \nu. \quad (4)$$

Во время нагрева потока равновесие нарушается в сторону десорбции молекул и $\mu < \nu$. Причем количество молекул, покидающих частицу в единицу времени, сильно растет с увеличением температуры. Количество же молекул, ударяющихся о поверхность частиц, при этом увеличивается в меньшей степени. Поэтому при повышении температуры равновесие между фазами нарушается и в течение некоторого времени молекулярный поток в направлении "частица--газ" будет превышать молекулярный поток в обратном направлении, т.е. происходит процесс десорбции. Если температура газа со всех сторон частицы одинакова, то и потоки молекул в различных направлениях равны. При попадании частицы адсорбента в одномерное температурное поле возникает градиент температуры по длине частицы, вследствие чего молекулярные потоки неуравновешиваются. Пренебрегая влиянием на частицу молекулярного потока в направлении "газ--твердая частица", для суммарного значения величины молекулярного потока в направлении "частица--газ" имеем

$$\Delta \nu = \nu_{+q} - \nu_{-q},$$

где ν_{+q} -- молекулярный поток со стороны теплового потока, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; ν_{-q} -- то же с противоположной стороны, $1/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Так как в начальный момент $\tau = 0$ при адсорбционном равновесии $\nu_{+q} = \nu_{-q}$, то суммарное значение величины потока газа в направлении "частица--газ" за время $d\tau$ можно оценить как

$$d\nu = \frac{V_0}{V} d\tau, \quad (6)$$

где V_0 -- объемная скорость десорбции газа с единичной площади адсорбента, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ (принимается постоянной для рассматриваемого промежутка времени нагрева); V -- объем, приходящийся на одну молекулу газа, м^3 .

Давление газа, испаряющегося с частицы за время τ , можно определить по зависимости

$$f = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} q d\tau. \quad (7)$$

Здесь $\int_0^{\tau} q d\tau$ -- давление на частицу, оказываемое одной молекулой при испарении.

Величина $\int_0^{\tau} q d\tau$ определяется из условия

$$m \frac{d\bar{u}}{d\tau} = -q, \quad (8)$$

где \bar{u} — средняя скорость молекулы газа, м/с.
Следовательно,

$$\int_0^{\tau} q d\tau = \int_{\tau_i}^{\tau_i+c} q d\tau = \int_{u_i}^{\bar{u}_i} m du, \quad (9)$$

Здесь c — время десорбции, с.
Отсюда следует

$$\int_0^{\tau} q d\tau = m\bar{u}. \quad (10)$$

Тогда

$$fd\tau = d(\Sigma m\bar{u}) = \bar{u} d(\Sigma m) = \bar{u} m \frac{V_{\partial}}{V} d\tau, \quad (11)$$

и величина давления запишется

$$f = \bar{u} m \frac{V_{\partial}}{V}. \quad (12)$$

Следовательно, для величины силы имеем

$$dF = fdS = \frac{V_{\partial}}{V} m\bar{u} dS \quad (13)$$

или

$$F = \frac{V_{\partial}}{V} m\bar{u}(S) dS = k_{\phi} \frac{V_{\partial}}{V} m\bar{u} S. \quad (14)$$

Здесь k_{ϕ} — коэффициент, зависящий от формы частицы; S — площадь поверхности частицы, обращенной к тепловому потоку. При интегрировании условно принимается, что испарение молекул равновероятно во всех направлениях.

Величина изменения средней скорости молекулы определяется из условия, что при определении реактивной силы учитывается направленное движение молекул в одном направлении. В этом случае при десорбции среднее изменение кинетической энергии молекулы газа происходит на величину

$$m \frac{\bar{u}^2}{2} = \frac{1}{2} kT, \quad (15)$$

откуда

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{kT}{m}}. \quad (16)$$

Тогда (14) переписывается

$$F = k_{\phi} \frac{1}{v} \sqrt{mkT} S V_{\theta}. \quad (17)$$

Делая замену

$$j = \frac{1}{v} \sqrt{mkT}, \quad (18)$$

где l -- характерный размер частицы, m , получим

$$F = k_{\phi} j l V_{\theta}. \quad (19)$$

Найдем зависимость для скорости десорбции

$$V_{\theta} = \frac{dK_s}{d\tau} \quad (20)$$

из теоретического уравнения Ленгмюра [1]

$$V_{\theta} = \frac{v_m b p}{1 + b p}. \quad (21)$$

Здесь

$$b = \frac{\mathcal{L}_0 \exp\left(-\frac{q}{kT}\right)}{k_a (2\pi mkT)^{\frac{1}{2}}}, \quad (22)$$

где \mathcal{L}_0 -- коэффициент пропорциональности; V_m -- объем газа, адсорбированного при полном заполнении мономолекулярного слоя, m^3 . Отсюда следует

$$\frac{dv_{\partial}}{d\tau} = v_m \frac{d\left(\frac{bp}{1+bp}\right)}{d\tau} \quad (23)$$

В рассматриваемом случае можно считать $p = \text{const}$, следовательно,

$$\frac{dv_{\partial}}{d\tau} = v_m \frac{p}{(1+bp)^2} \frac{db}{d\tau}, \quad (24)$$

и окончательно имеем

$$V_{\partial} = -\frac{\alpha_0 v_m}{k \sqrt{2\pi mk}} \exp\left(\frac{q}{kT}\right) \left(-\frac{q}{k} T^{-\frac{5}{2}} + \frac{1}{2} T^{-\frac{3}{2}}\right) \frac{dT}{d\tau}. \quad (25)$$

Выражение для величины реактивной силы, действующей на частицу адсорбента, в результате воздействия на поток одномерного теплового поля можно записать

$$F = -k_n j l \varphi(T) \frac{dT}{d\tau}. \quad (26)$$

Очевидно, что уравнение (26) может быть верно только для тех процессов адсорбции, которые описываются уравнением (21). Это ограничивает применение (26). Поэтому гораздо точнее можно определить V_{∂} на основе экспериментальных данных. Что же касается оценки величины реактивной силы, то для сферической частицы $r = 10^{-5}$ м при скорости нагрева 10 К/с и средней температуре потока 273 К, величине десорбции $1,2 \cdot 10^{-6}$ м³/кг К величина силы составит $3 \cdot 10^{-15}$ Н.

Л и т е р а т у р а

1. Брунауэр С. Адсорбция газов и паров. М., 1948.