

УДК 532.529:536.24:536.423

МАССООБМЕН ПРИ ДЕСОРБЦИИ ГАЗА С ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ ПРИ НАЛИЧИИ СПУТНОГО ПОТОКА

В. И. Терехов, В. П. Лебедев, Н. Е. Шишкин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследований динамики и массообмена при десорбции газа из жидкой пленки при наличии спутного воздушного потока. Расчетная модель основана на решении интегральных соотношений импульсов и диффузии для газообразной и жидкой фаз. Анализ проведен для ламинарного и турбулентного режимов течения пленки. Опытное изучение массоотдачи проводилось при десорбции углекислого газа из водной пленки. Получены критериальные соотношения для массопереноса в газообразной и жидкой фазах. Опыты показали, что коэффициенты массообмена на порядок выше соответствующих значений в случае течения гладкой пленки. Обсуждаются возможные механизмы столь сильной интенсификации массоотдачи пленки жидкости в спутном газовом потоке.

Одним из эффективных способов интенсификации массопереноса в процессах абсорбции или десорбции газа в жидких пленках является подача спутного (встречного) потока газа или пара вдоль поверхности раздела газ — жидкость. Экспериментально эта задача подробно изучалась в работах [1–4] для случая гравитационного стекания пленок как для восходящего, так и для нисходящего движения фаз. Согласно данным этих работ характер воздействия спутного потока на массообмен является достаточно сложным. Так, при скоростях газа $V_0 < 5$ м/с наличие спутности практически не оказывает влияния на массоотдачу и интенсивность переноса определяется только числом Рейнольдса пленки Re_s . При скоростях пара $V_0 > 10$ м/с резко интенсифицируется массоперенос в пленке, и при $Re_s = \text{const}$ наблюдается линейная зависимость коэффициента массоотдачи от скорости газового потока. Этот эффект имеет место как при встречном, так и при спутном течении газа или пара, и при скоростях $V_0 = 40 \div 50$ м/с интенсивность массообмена возрастает почти в 10 раз по сравнению с чисто гравитационным стеканием пленки с таким же числом Рейнольдса.

Увеличение числа Рейнольдса пленки приводит к усилению воздействия спутного потока на межфазный массоперенос. В экспериментах [3] обнаружено, что рост средней массоотдачи наблюдается при уменьшении длины поверхности, по которой стекает жидкая пленка. В этом случае динамические и диффузионные пограничные слои становятся тоньше, что вызывает усиление межфазного динамического взаимодействия, приводящее к росту конвективного переноса в газообразной и особенно в жидкой фазах.

Более детальный расчетный анализ [4–6] и результаты экспериментов [3, 4, 7] показали, что резкое увеличение интенсивности тепло- и массопереноса обусловлено в основном усилением перемешивания жидкости по толщине пленки за счет развития на свободной поверхности пленки волн различной амплитуды и частоты. Определенное влияние на процесс оказывают каплеобразование и повторное взаимодействие сорванных капель и поверхности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-02-178980).

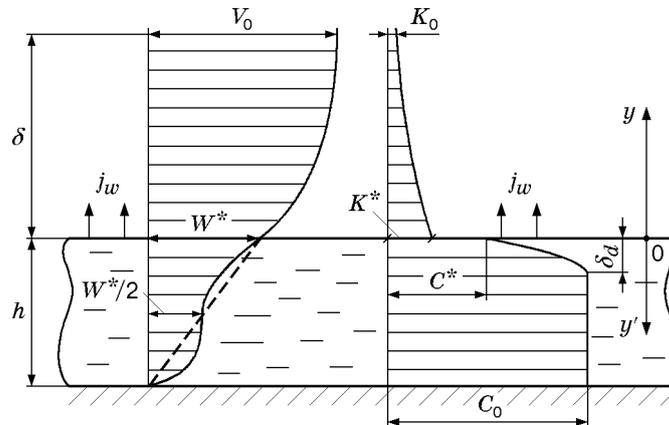


Рис. 1

жидкости. По данным работы [8], в режиме капельного течения жидкости коэффициенты массопереноса могут в 3–4 раза превышать эти значения при пленочном течении.

Задача о массопереносе между жидкой пленкой и спутным газовым потоком является многопараметрической, поэтому для расчета сопряженного массообмена возможно использование простых моделей, основанных на решении интегральных соотношений импульсов и диффузии в газе и жидкости. В данной работе в этой постановке решается задача о динамике и массообмене при десорбции слабо растворимого газа из пленки жидкости при ламинарном и турбулентном режимах течения газового потока. Представлены результаты экспериментальных исследований интенсивности десорбции растворимого в воде углекислого газа в спутный воздушный поток. Основной целью являлось определение закономерностей изменения массоотдачи по длине пленки, коэффициентов массообмена и интегральных параметров как для жидкой, так и для газообразной фазы.

1. Модель межфазного взаимодействия пленки и спутного потока газа. Схема рассматриваемого течения показана на рис. 1. Пленка жидкости с растворенным в ней газом подается вдоль неограниченной плоской поверхности и приводится в движение газовым потоком за счет сдвиговых напряжений. На границе фаз выполняется условие равенства скоростей и касательных напряжений. Рассмотрим участок стабилизированного течения пленки. Профиль скорости в ней при ламинарном режиме течения является линейным, при турбулентном течении — автомодельным и представляет собой два сомкнувшихся пограничных слоя на межфазной границе и твердой стенке [9]. Число Рейнольдса пленки $Re_s = q/\nu_{ж}$ из-за малости поперечного потока десорбируемого газа полагается постоянным по длине. Здесь $q = \bar{W}h = W_s S$ — объемный расход жидкости через единицу ее

ширины; $\bar{W} = (1/h) \int_0^h W dy'$ — среднерасходная скорость пленки; W_s — скорость пленки в начальном сечении; S — ширина щели на входе, через которую подается пленка; h — текущая толщина пленки. Скорость на межфазной границе W^* и толщина пленки h зависят от продольной координаты.

Толщина диффузионного пограничного слоя по сравнению с толщиной пленки полагается малой ($\delta_d \ll h$) из-за малости коэффициента диффузии слабо растворимых газов в воде. Естественным условием на границе фаз является непрерывность поперечного потока вещества j_w и взаимосвязь массовых концентраций десорбируемого компонента в жидкой и газообразной фазах, описываемая законом Генри

$$C^* = \Gamma_k K^*, \quad (1)$$

где C^* и K^* — массовая концентрация десорбируемого газа на границе в жидкой и газообразной фазах соответственно; Γ_k — коэффициент Генри (для углекислого газа, растворенного в воде при нормальных условиях, $\Gamma_k = 590$ [10]).

Интегральные уравнения импульсов и диффузии для пограничного слоя в газовой фазе имеют вид [11]

$$\frac{d\text{Re}^{**}}{d\bar{x}} = \frac{C_f}{2} (1 - b_1) \text{Re}_L; \quad (2)$$

$$\frac{d\text{Re}_d^{**}}{d\bar{x}} + \frac{\text{Re}^{**}}{\Delta K} \frac{d(\Delta K)}{d\bar{x}} = \text{St}_d (1 - b_{1d}) \text{Re}_L. \quad (3)$$

Здесь $\text{Re}^{**} = \delta^{**} \Delta V_0 / \nu_\Gamma$, $\text{Re}_d^{**} = \delta_d^{**} \Delta V_0 / \nu_\Gamma$, $\text{Re}_L = L \Delta V_0 / \nu_\Gamma$ — числа Рейнольдса, построенные по толщинам потери импульса, массы и длине соответственно; $C_f/2$ — коэффициент трения на границе раздела фаз; $b_1 = 2j_w / (\rho_0 \Delta V_0 C_f)$, $b_{1d} = j_w / (\rho_0 \Delta V_0 \text{St}_d)$ — динамический и диффузионный параметры проницаемости; $\text{St}_d = -\rho D (dK/dy)^* / (\rho_0 \Delta V_0 \Delta K)$ — коэффициент массообмена; $\Delta V_0 = V_0 - W^*$ — относительная скорость; $\Delta K = K^* - K_0$ — концентрационный напор; $\bar{x} = x/L$ — безразмерная продольная координата.

Интегральные уравнения для жидкой фазы имеют вид, аналогичный (2), (3).

Условия на межфазной границе записываются в виде

$$V_\Gamma = W_{\text{ж}} = W^*, \quad \tau_\Gamma = \tau_{\text{ж}}^* = \tau_w, \quad j_\Gamma = j_{\text{ж}}^*. \quad (4)$$

С использованием уравнения сохранения массы на стенке последнее соотношение принимает вид

$$\rho_{\text{ж}} D_{\text{ж}} \left(\frac{\partial C}{\partial y'} \right)^* \frac{1}{1 - C^*} = -\rho_0 D_\Gamma \left(\frac{\partial K}{\partial y} \right)^* \frac{1}{1 - K^*}. \quad (5)$$

Координата y направлена от границы раздела газ — жидкость в газообразную фазу, а y' — в жидкую (рис. 1).

Поскольку в процессе абсорбции и десорбции газов выполняется условие $C^* \ll 1$, $K^* \ll 1$, выражение (5) можно представить в упрощенной форме

$$K^* = \frac{C_0 - C^*}{1/\Gamma + (\text{St}_{d\Gamma}/\text{St}_{d\text{ж}}) 2\rho_0 \Delta V_0 / (\rho_{\text{ж}} W^*)} - K_0. \quad (6)$$

Оценки показывают, что $C_0 \gg C^*$, тогда при десорбции слаборастворимых газов ($\Gamma \gg 1$) в инертный поток ($K_0 \rightarrow 0$) соотношение (6) принимает вид

$$K^* = C_0 \frac{\text{St}_{d\text{ж}} \rho_{\text{ж}} W^*}{2 \text{St}_{d\Gamma} \rho_0 \Delta V_0}. \quad (7)$$

Концентрация десорбируемого газа K^* зависит как от концентрации этого газа, растворенного в жидкости C_0 , так и от соотношений коэффициентов массообмена в жидкой и газообразной фазах, а также от массовых скоростей пленки и воздушного потока.

Соотношения (1)–(7) справедливы как для ламинарного, так и для турбулентного режимов течения газового и жидкостного потоков. Режим течения определяет коэффициенты трения $C_f/2$ и теплообмена St_d , входящие в уравнения (2), (3), а также в подобные соотношения для жидкой фазы.

Наибольший практический интерес представляет турбулентный режим течения спутного газового потока. При этом течение пленки может быть как ламинарным, так и турбулентным. Исследуем эти режимы.

Турбулентно-ламинарный режим. Анализ опытных данных по абсорбции и десорбции газов из пленок [1–5, 7] показал, что интенсивность поперечного потока вещества на границе фаз мала, поэтому его влиянием на законы трения и массообмена можно пренебречь.

Следовательно, параметры проницаемости будут близки к нулю ($b_1 = b_{1d} \approx 0$), а коэффициенты трения и массообмена $C_f/C_{f0} = St_d/St_{d0} \approx 1$, где $C_{f0}/2$ и St_{d0} — коэффициенты трения и массообмена при отсутствии на поверхности поперечного потока вещества. Следовательно, уравнения (2), (3) переходят в уравнения, описывающие трение и массообмен в стандартном пограничном слое [11]. Тогда соотношения для расчета трения и массообмена записываются в следующей форме:

— в газообразной фазе

$$\tau_\Gamma^* = 0,029\rho_0\Delta V_0^2 Re_x^{-0,2}, \quad St_d = 0,0362 Re_x^{-0,2} Sc_\Gamma^{-0,6}; \quad (8)$$

— в жидкой фазе с учетом линейного распределения скорости

$$\tau_{ж}^* = -\left(\mu_{ж} \frac{dW}{dy'}\right)^* = \mu_{ж} \frac{W^*}{h}, \quad St_{dж} = 0,332 Re_{xж}^{-1} Sc_{ж}^{-2/3}, \quad (9)$$

где $Re_x = \Delta V_0 x / \nu_\Gamma$, $Re_{xж} = W^* x / \nu_{ж}$ — числа Рейнольдса, рассчитанные по продольной координате для газообразной и жидкой фаз соответственно; $Sc_\Gamma = \nu_\Gamma / D_\Gamma$, $Sc_{ж} = \nu_{ж} / D_{ж}$ — числа Шмидта при диффузии углекислого газа в воздухе и воде соответственно.

Автомодельные профили скорости и концентрации в газообразной и жидкой фазах имеют вид

$$\frac{\Delta V}{\Delta V_0} = \frac{K - K^*}{K_0 - K^*} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^n, \quad 0 < y < \delta; \quad (10)$$

$$\frac{C - C^*}{C_0 - C^*} = 2 \frac{y'}{\delta_d} - \left(\frac{y'}{\delta_d}\right)^2, \quad 0 < y' < \delta_d. \quad (11)$$

Объемный расход жидкости, приходящийся на единицу ширины пленки, определяется

$$\text{соотношением } q = \int_0^h W dy' = \frac{W^* h}{2} = W_s S.$$

При условии, что спутный газовый поток является развитым турбулентным ($n = 1/7$), из соотношений (8)–(10) в предположении $W^* \ll V_0$ для скорости на границе фаз получим уравнение

$$\frac{W^*}{V_0} = 0,24 \left(\frac{\rho_0}{\rho_{ж}}\right)^{1/2} Re_s^{1/2} Re_x^{-0,1}. \quad (12)$$

Соответственно выражение для толщины пленки можно записать в виде

$$\frac{h}{x} = 8,3 \left(\frac{\rho_{ж} \nu_{ж}^2}{\rho_\Gamma \nu_\Gamma^2}\right)^{1/2} Re_s^{1/2} Re_x^{-0,9}. \quad (13)$$

При решении диффузионной задачи получаем выражение для потока массы десорбируемого газа на поверхности пленки

$$\frac{j_w}{\rho_0 V_0} = 0,115 \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_0}\right)^{3/4} \left(\frac{\nu_{ж}}{\nu_\Gamma}\right)^{1/2} Re_s^{1/4} Re_x^{-0,55} b_{1ж} Sc_{ж}^{-2/3}, \quad (14)$$

где $b_{1ж} = (C_0 - C^*) / (1 - C^*)$ — диффузионный параметр проницаемости, определяемый по жидкой фазе.

Турбулентно-турбулентный режим. Выражения для скорости, толщины пленки и коэффициентов массоотдачи могут быть получены аналогично турбулентно-ламинарному режиму, если вместо соотношений (9), (11) использовать законы трения и массообмена, а также профили скорости и концентраций для турбулентной пленки. В итоге формулы

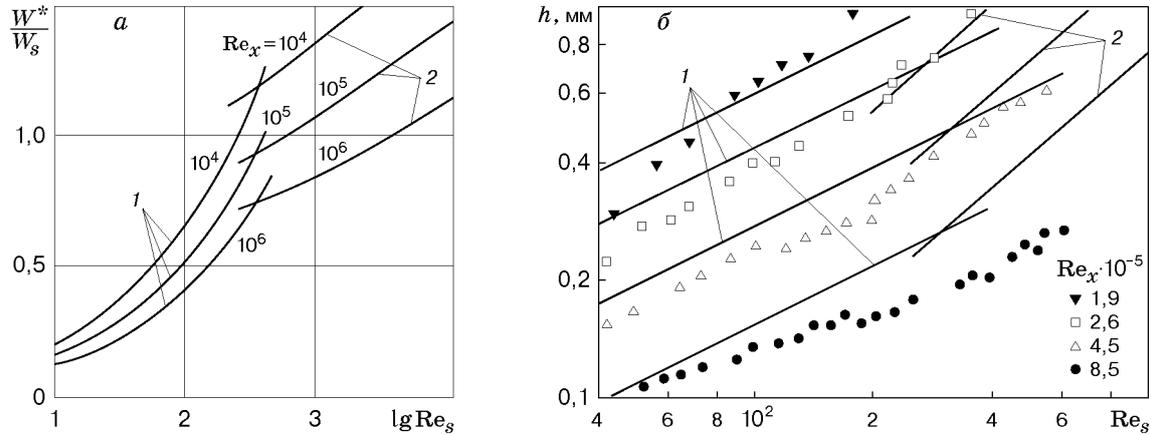


Рис. 2

для определения скорости на межфазной границе, толщины пленки и поперечного потока десорбируемого газа принимают вид

$$W^*/V_0 = 2,08(\rho_0/\rho_{ж})^{1/2}Re_s^{1/8}Re_x^{-0,1}, \quad h/x = 0,961(\rho_{ж}\nu_{ж}^2/(\rho_0\nu_{г}^2))^{1/2}Re_s^{7/8}Re_x^{-0,9}, \quad (15)$$

$$j_w/(\rho_{г}V_0) = 0,0325(\rho_{ж}/\rho_0)^{0,6}(\nu_{ж}/\nu_{г})^{0,2}Re_s^{0,1}Re_x^{-0,28}b_{1ж}Sc_{ж}^{-0,6}.$$

Как следует из соотношений (12)–(15), локальные характеристики пленки в спутном потоке зависят от чисел Рейнольдса Re_s и Re_x . Кроме того, скорость на межфазной границе зависит от соотношения плотностей газа и жидкости, а толщина пленки и поперечный поток вещества — и от соотношения их вязкости.

Влияние чисел Рейнольдса Re_s и Re_x на соотношение скоростей W^*/W_s и толщину пленки h представлены на рис. 2. Линиями 1 обозначены турбулентно-ламинарные, а линиями 2 — турбулентно-турбулентные взаимодействия. Расчеты скорости на межфазной границе (рис. 2,а) проведены для отношения скоростей пленки и спутного воздушного потока на входе $W_s/V_0 = 0,05$. Видно, что характер изменения параметров W и h при смене режимов течения существенно различается. Кроме того, как следует из рис. 2,а, варьируя соотношения чисел Рейнольдса пленки и потока, можно уменьшить или увеличить скорость на границе фаз по сравнению с начальной скоростью пленки W_s . Подобное воздействие параметры режима оказывают и на толщину пленки.

На рис. 2,б представлены расчетные и экспериментальные [12] зависимости средней толщины пленки при наличии спутного потока газа от Re_s . Можно отметить удовлетворительную корреляцию расчетов с результатами экспериментов. Имеющееся отличие может быть обусловлено тем, что, по данным [12], поведение толщины пленки и волновой характер ее изменения зависят от режима течения и параметра спутности $m = \rho_{ж}W_s/(\rho_0V_0)$.

2. Экспериментальное исследование массоотдачи с поверхности пленки в спутном потоке. Опыты проводились на установке, подробное описание которой дано в работе [8]. Рабочий канал представлял собой начальный участок трубы диаметром $D_0 = 0,1$ м и длиной $L = 0,5$ м. Дистиллированная вода, насыщенная углекислым газом, подавалась на вход через тангенциальную щель высотой $S = 0,5$ мм. Число Рейнольдса пленки $Re_s = 100 \div 150$. Скорость спутного воздушного потока $V_0 = 25 \div 45$ м/с, что обеспечивало равномерную толщину пленки по образующей канала. Согласно картам режимов двухфазного взаимодействия [13, 14] данным условиям соответствует течение с трехмерными волнами на поверхности; при скоростях $V_0 > 30$ м/с сильное влияние на течение может оказывать унос капель. Число Рейнольдса воздушного потока $Re_0 = V_0D_0/\nu_0$ соответствовало турбулентному режиму течения ($Re_0 > 10^5$), параметр спутности в опытах

составлял $m = 5 \div 10$. Изменение концентрации десорбируемого газа по длине пленки измерялось путем отбора проб с дальнейшим титрометрическим анализом. Интенсивность поперечного потока вещества в опытах определялась соотношением

$$j_w = q\Delta C/\Delta x,$$

где $\Delta C = C_n - C_x$ — разность средних по сечению пленки концентраций CO_2 на входе канала и в текущем сечении, и в опытах определялись осредненные по текущей координате значения поперечного потока. Концентрация растворенного газа на внешней границе диффузионного слоя определялась по измеренному среднему значению концентрации углекислого газа в рассматриваемом сечении и расчетной толщине диффузионного пограничного слоя согласно методике, представленной в [15].

Изменение массовых концентраций растворенного в пленке газа и поперечного потока вещества на границе фаз показано на рис. 3,а. Наибольшее изменение концентрации и соответственно потока массы наблюдается на начальном участке пленки. Экспериментальные значения относительного массового потока (рис. 3,б), полученные при различных параметрах режима, имеют тенденцию к обобщению. В то же время поток десорбируемого газа мал ($j_w/(\rho_0 V_0) \sim 10^{-5}$), поэтому его влиянием на законы трения и массообмена можно пренебречь. На рис. 3,б линии 1 и 2 соответствуют результатам расчетов интенсивности поперечного потока вещества на границе фаз для турбулентно-ламинарного и турбулентно-турбулентного режимов течения фаз соответственно. Расчеты проводились при средней в опытах концентрации растворенного газа на входе $C_n = 8,5 \cdot 10^{-4}$. Для удобства сопоставления расчетные и экспериментальные значения $j_w/(\rho_0 V_0)$ приведены в различных масштабах (левая и правая шкала соответственно). Обозначение точек такое же, как на рис. 3,а.

Из рис. 3,б следует, что различие между опытными и расчетными значениями для турбулентно-турбулентного режима составляет примерно один порядок, а для турбулентно-ламинарного течения это различие еще больше.

На следующем этапе производилась критериальная обработка результатов экспериментов. Коэффициенты массообмена определялись по жидкой и газообразной фазам:

$$\text{St}_ж = 2j_w/(\rho_ж W^* b_{1ж}), \quad \text{St}_г = j_w/(\rho_0 V_0 b_{1г}),$$

где $b_{1ж} = (C_0 - C^*)/(1 - C^*)$, $b_{1г} = (K^* - K_0)/(1 - K^*)$ — параметры проницаемости. С учетом принятых ранее допущений $b_{1ж} \approx C_0$, $b_{1г} \approx K^*$.

Экспериментальное значение толщины потери массы также определялось для обеих фаз. Из интегрального соотношения диффузии (3) для газообразной фазы можно получить следующее выражение:

$$\text{Re}_d^{**} = \frac{1}{\mu_0 K^*} \int_0^x j_w dx.$$

Аналогичный вид имеет уравнение диффузии газа, растворенного в жидкости.

Экспериментальные данные о диффузионных числах Стэнтона для газового (светлые точки) и жидкого (темные точки) пограничных слоев показаны на рис. 4,а. Обозначения точек соответствуют параметрам режима на рис. 3. Несмотря на значительный разброс опытных данных, можно отметить, что они соответствуют турбулентному режиму течения, характеризуемому корреляционной зависимостью

$$\text{St}_d = 0,36 \text{Re}_x^{-0,2} \text{Sc}^{-0,6}. \quad (16)$$

Более четко турбулентный характер массообмена подтверждается данными на рис. 4,б, где представлена экспериментальная зависимость числа Рейнольдса, построенного по толщине потери массы, от Re_x . Эта зависимость описывается эмпирической формулой

$$\text{Re}^{**} = 0,41 \text{Re}_x^{0,8} \text{Sc}^{0,6}. \quad (17)$$

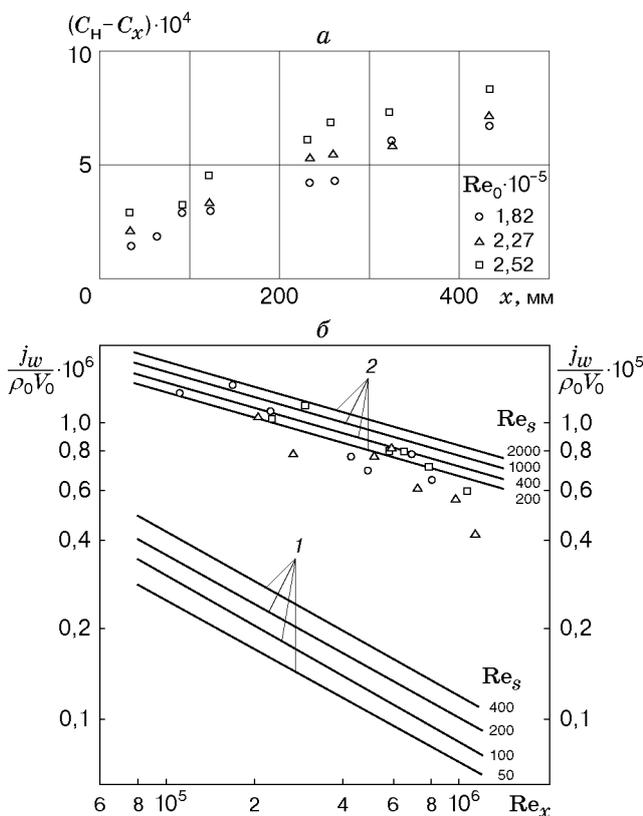


Рис. 3

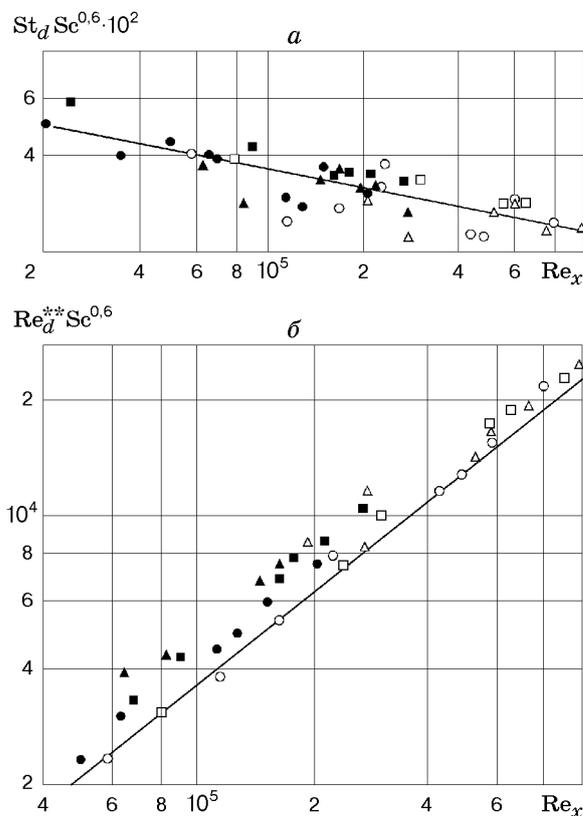


Рис. 4

Здесь показатель степени при числе Рейнольдса Re_x соответствует турбулентному закону массообмена ($n = 0,8$).

Отметим, что несмотря на значительное отличие коэффициентов диффузии CO_2 в жидкости и воздухе ($Sc = 670; 0,93$ соответственно), экспериментальные точки на рис. 4 для массопереноса в пленке и воздушном пограничном слое описываются единой зависимостью в силу непрерывности массового потока десорбируемого газа на границе фаз. Различие величин диффузионных сопротивлений в газообразной и жидкой фазах определяют числа Шмидта.

Сопоставление экспериментальных корреляций (16), (17) с законами тепло- и массообмена в турбулентном пограничном слое на гладкой непроницаемой стенке [11] показывает, что интенсивность массоотдачи с поверхности пленок на порядок выше, чем в стандартных условиях. Это подтверждается расчетными и экспериментальными данными, представленными на рис. 3, б. Столь интенсивный массообмен обусловлен прежде всего волновым характером течения пленки, причем при стекании пленки, сопровождаемом спутным течением, происходит более сильный массообмен, чем в гравитационных турбулентных пленках [7]. Усиление массообмена может быть вызвано наблюдаемыми в опытах эмульсированием жидких пленок [16] и уносом капель с их поверхности [1, 3–5, 12, 13], что требует дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность С. В. Алексеенко за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конобеев Б. И., Малюсов В. А., Жаворонков Н. М. Изучение пленочной абсорбции при высоких скоростях газа // Хим. пром-сть. 1961. № 7. С. 31–37.

2. **Николаев Н. А., Жаворонков Н. М.** Пленочная абсорбция двуокиси углерода при высоких скоростях газа в режиме нисходящего прямотока // Хим. пром-сть. 1965. № 4. С. 50–53.
3. **Николаев Н. А., Холпанов Л. П., Малюсов В. А., Жаворонков Н. М.** Интенсификации переноса массы в пленке жидкости, двигающейся прямоточно с высокоскоростным потоком газа или пара // Теорет. основы хим. технологии. 1989. Т. 23, № 5. С. 563–568.
4. **Холпанов Л. П., Шкадов В. Я.** Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела. М.: Наука, 1990.
5. **Холпанов Л. П., Бабак В. Н., Малюсов В. А., Жаворонков Н. М.** Исследование тепло- и массообмена при турбулентном течении пленки жидкости и газа в режимах прямотока // Теорет. основы хим. технологии. 1979. Т. 13, № 3. С. 323–330.
6. **Абрамов Ю. И.** Течение тонких пленок вязкой жидкости в спутных газовых струях // Инж.-физ. журн. 1981. Т. 40, № 4. С. 622–630.
7. **Алексеенко С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г.** Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1992.
8. **Лебедев В. П., Терехов В. И., Шишкин Н. Е.** Массообмен при десорбции газа из мелкодиспергированных капель жидкости в пристенной двухфазной струе // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 3. С. 122–129.
9. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
10. **Рамм В. М.** Абсорбция газов. М.: Химия, 1966.
11. **Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И.** Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985.
12. **Дейч М. Е., Тетера И. П.** Результаты статистического анализа волновой структуры поверхности в двухфазном пограничном слое // Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18, № 4. С. 801–811.
13. **Стырикович М. Е., Полонский В. С., Циклаури Г. В.** Тепломассообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных станций. М.: Наука, 1982.
14. **Fukano T., Kinone Y., Matsunaga T.** Mass transfer into a liquid film flowing cocurrently with a gas flow // Proc. of the 10th Intern. heat transfer conf. Brighton, UK: Taylor-Francis, 1994. V. 3. P. 311–316.
15. **Нигматулин Б. И., Горюнова М. З., Васильев В. К.** К обобщению данных по теплоотдаче при течении жидких пленок вдоль твердых поверхностей // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19, № 5. С. 991–1001.
16. **Чен-Ше-Фу, Ибеле В.** Потери напора и толщина жидкой пленки при кольцевом двухфазном чисто пленочном течении и течении с образованием эмульсии // Теплопередача. 1964. № 1. С. 116–125.

Поступила в редакцию 16/VI 1999 г.
