

УДК 532.529.5; 66.021.3

Экспериментальное исследование межфазного массообмена при переходе от снарядного к пузырьковому течению в прямоугольном микроканале*

Г.В. Барткус¹, Н.А. Филатов², А.С. Букатин^{2,3}, В.В. Кузнецов¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский
академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН

³Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

E-mail: germanbartkus@gmail.com

В работе экспериментально исследуется структура газожидкостного течения и межфазный массообмен при переходе от снарядного к пузырьковому течению смеси этанол-СО₂ в горизонтальном прямом микроканале. Эксперименты выполнены для канала с прямоугольным сечением 141×385 мкм² в диапазоне приведенных скоростей газа и жидкости $J_G = 0,16-0,8$ м/с, $J_L = 0,22-0,5$ м/с. Для определения изменения объема газового снаряда по длине микроканала вследствие абсорбции СО₂ использовался метод высокоскоростной визуализации с последующей цифровой обработкой изображений. Проведены измерения частоты генерации, скорости, размеров и изменения объема газовых снарядов и пузырей по длине канала и вычислен объемный коэффициент массоотдачи k_{La} со стороны жидкости. Выполнено сравнение измеренного объемного коэффициента массоотдачи с известными корреляциями и предложена новая корреляционная зависимость для перехода от снарядного к пузырьковому течению вследствие межфазного массообмена.

Ключевые слова: прямоугольный микроканал, газожидкостное течение, межфазный массообмен, абсорбция СО₂.

Введение

Микрореакторы существенно опережают обычные реакторы по величине объемного коэффициента массоотдачи k_{La} [1]. Это достигается большой удельной площадью контакта фаз и высоким потенциалом интенсификации процессов массообмена, что определяет перспективность применения микроканалов в химико-биологических технологиях [2, 3] и для задач охлаждения теплонапряженных устройств [4]. Для реализации

* Исследование выполнено в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН за счет гранта РНФ № 21-19-00626, <https://rscf.ru/project/21-19-00626/>.

преимуществ микроканальных систем необходимо детальное понимание гидродинамики и процессов тепло- и массопереноса, возникающих на микромасштабе. Оно является критически важным для решения актуальной на сегодняшний день задачи утилизации углекислого газа [5, 6] в рамках стратегии низкоуглеродного развития и мер по декарбонизации.

Гидродинамика газожидкостного и двухжидкостного течений в прямоугольных микроканалах характеризуется большим числом определяющих параметров, которые включают геометрию входного смесителя [7, 8], отношение сторон канала [9], шероховатость стенок, отношение расходов и физические свойства используемых фаз [10, 11]. Одним из наиболее важных для практического применения режимов течения в микроканалах является снарядное течение (тейлоровское течение), которое характеризуется последовательностью удлиненных пузырей, отделенных жидкими перемычками [12]. В таком течении газовая фаза отделена от стенки микроканала пленкой жидкости, при этом в перемычке жидкости возникает циркуляционное течение, способствующее интенсификации массопереноса в передней и задней частях удлиненного пузыря. При абсорбции CO_2 вдоль канала происходит уменьшение объема и переход от удлиненной формы пузыря-снаряда ($L_{\text{bub}} > w$, где L_{bub} — длина снаряда, w — ширина канала) к форме пузыря размером меньше ширины канала ($L_{\text{bub}} < w$) [13]. Для достижения полного растворения газовой фазы по длине канала реализуют различные методы увеличения коэффициента массоотдачи, основным фактором которых является наличие изгибов по длине канала [14], локальных сужений и расширений в рамках прямой геометрии канала [15, 16], химической абсорбции [1, 6] и др.

Исследования межфазного массообмена при физической и химической абсорбции CO_2 в жидкости при течении в микроканалах проводились в работах [1, 17, 18]. Для измерения объемного коэффициента массоотдачи $k_1 a$ в них использовались интегральные методы (титрование) [1], контрастная визуализация [17], измерение изменения объема пузыря газа по длине канала [18]. В работах [1, 19] были разработаны корреляционные зависимости для прогнозирования $k_1 a$ при абсорбции CO_2 в снарядном режиме течения. Наиболее часто используемой моделью для определения коэффициента массоотдачи для снарядного течения является модель элементарной ячейки.

Математические модели для расчета массоотдачи при снарядном течении в микроканале с круглым сечением были предложены в работах [20–23], а в канале прямоугольного сечения — в [24]. В данных моделях рассматривались различные механизмы массообмена в рамках элементарной ячейки. Они включают совместный массоперенос из головной и хвостовой частей снаряда в перемычку жидкости, перенос из боковой части пузыря в пленку жидкости в области снаряда и массообмен между тонким пристенным слоем жидкости и объемом жидкой перемычки.

Экспериментальные исследования массообмена при физической абсорбции CO_2 для газожидкостного течения проводились преимущественно для снарядного режима течения, который сохранялся по всей длине микроканала. Вместе с тем при полном растворении газа, которое имеет место в ряде производственных процессов, по длине канала происходит переход от снарядного течения к пузырьковому. Массообмен при химической абсорбции для пузырькового течения в микроканале изучался в работе [25]. Исследования массообмена при физической абсорбции для переходного режима течения от снарядного к пузырьковому в микроканале ранее не проводились и такой режим течения не выделялся в опубликованных работах.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение межфазного массообмена при физической абсорбции в горизонтальном прямоугольном микроканале для переходного режима течения смеси этанол–углекислый газ. Рассматриваемый микроканал имеет сечение $141 \times 385 \text{ мкм}^2$ и Т-образный боковой смеситель на входе для ввода фаз. Новизна исследований заключается в определении объемного коэффициента массоотдачи для переходного течения в канале с прямоугольным сечением и обобщении полученных данных в виде корреляционной зависимости. Объемные коэффициенты массоотдачи определяются по изменению объема пузыря по длине микроканала с использованием методики [24].

Экспериментальная установка и методика измерения

Схема экспериментального стенда для исследования структуры газожидкостного течения представлена на рис. 1а. Углекислый газ CO_2 поступал из баллона высокого давления через редуктор на вход в контроллер расхода газа Bronkhorst EL-FLOW F-201CV и далее в смеситель микроканала для формирования газожидкостного течения. Перед входом в канал устанавливался тройник, одно плечо которого было подключено к датчику давления HoneyWell 40PC015G, второе — к контроллеру расхода, третье — на вход в микроканал. Сигнал с датчика давления записывался с помощью высокоскоростного АЦП ZETLab 210 и впоследствии обрабатывался на компьютере. При вычислении объемного расхода газа Q_G в заданном сечении микроканала вводится поправка на плотность газа в этом сечении, которая определяется по давлению в соответствии со справочными данными [26]. Величина давления рассчитывается с использованием линейной аппроксимации изменения давления по длине рабочего участка. Приведенная

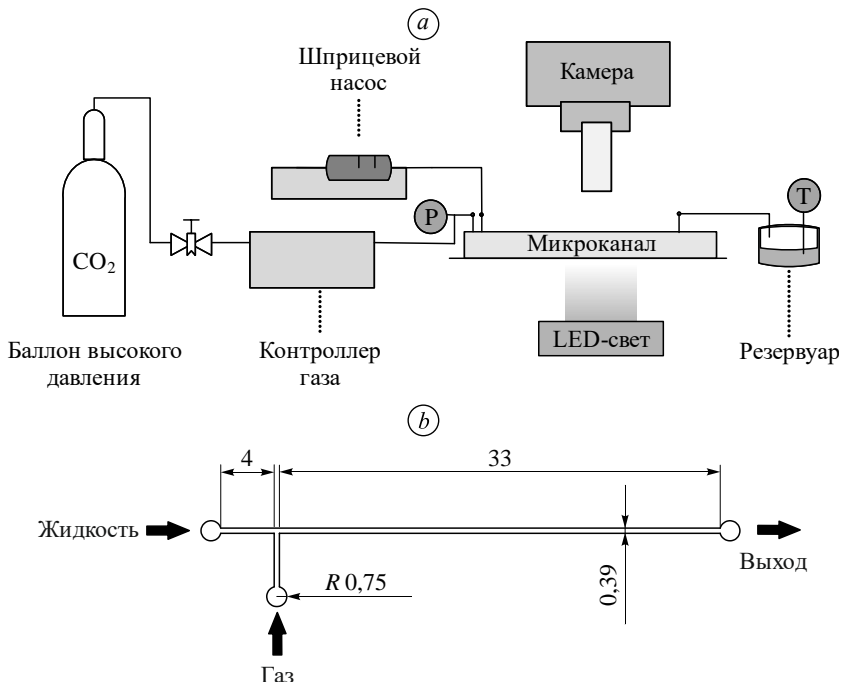


Рис. 1. Схемы экспериментальной установки (а) и микроканала с Т-образным боковым входом (б).

Размеры указаны в мм.

скорость фаз определяется как объемный расход, деленный на площадь сечения микроканала: $J_{L,G} = Q_{L,G} / S_{\text{chan}}$.

Контроль расхода жидкости осуществлялся с помощью высокоточного шприцевого насоса KD Scientific Gemini 88 (с точностью дозирования $\pm 0,35\%$). Для проведения экспериментов всегда использовалась новая жидкость: на выходе газожидкостная смесь стекала в открытый бак и при этом газ уходил в атмосферу.

Регистрация структуры газожидкостного течения выполнялась с помощью видеокамеры Optronis CR600x2 и объектива 6,3x ausJENA Planachromat в начале микроканала на расстоянии 2–3 мм от смесителя в зависимости от длины пузыря, в середине на расстоянии 15 мм от смесителя и в конце микроканала — на расстоянии 4 мм от выхода канала. Камера и LED-источник располагались по разные стороны прозрачного микроканала по нормали к его поверхности, что позволило получить визуализацию с разрешением 4,2 мкм/пикс. Для регистрации течения использовалось освещение потока параллельным пучком света. Частота съемки составляла 2003 кадр/с. Данные видеосъемки обрабатывались с использованием программного пакета DMV [27].

Микроканал был изготовлен из материала PDMS методом мягкой литографии в Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете им. Ж.И. Алфёрова РАН [28] и имел прямоугольное сечение 141×385 мкм². Его схема показана на рис. 1*b*. Размеры канала контролировались на этапе изготовления при создании мастер-формы, которая в последующем заливалась полидиметилсилоксаном (PDMS). После сборки сечение канала измерялось с помощью оптического микроскопа. Размеры микроканала определялись с использованием усреднения по 10 измерениям по длине канала, глубина канала определялась при фокусировании на его верхнюю и нижнюю стенки. Стандартная неопределенность измерения ширины канала составляла $\pm 1,83$ мкм, глубины — $\pm 2,5$ мкм.

Формирование газожидкостного течения происходило в боковом Т-образном смесителе, в котором ввод газа осуществлялся перпендикулярно каналу с потоком жидкости, как показано на рис. 1*b*. Поверхность канала из PDMS является гидрофобной для воды, и в качестве рабочей жидкости был выбран 90 %-й (по массе) водный раствор этанола (далее называемый этанолом). Коэффициент диффузии для раствора CO₂ в этаноле составляет $D_{\text{diff}} = 3,527$ м²/с при температуре 25 °C [18, 29]. Выбор этанола связан с лучшей смачиваемостью поверхности PDMS, чем в случае воды. Это позволило реализовать периодическое снарядное течение на входе в канал, что не наблюдалось для воды при аналогичных приведенных скоростях газа и жидкости в канале из PDMS, но является типичным для каналов, изготовленных из материалов с хорошей смачиваемостью, например, стекла. Измерения контактного угла на поверхности PDMS были выполнены в работе [24] и показали среднее значение, равное $(23 \pm 3)^\circ$.

Структура газожидкостного течения при абсорбции CO₂ в этаноле

Измерение коэффициента массоотдачи при абсорбции углекислого газа в этаноле выполнялось для периодического снарядного режима и перехода от снарядного к пузырьковому течению. Эксперименты проводились для диапазона приведенных скоростей газа и жидкости $J_G = 0,16 - 0,8$ м/с, $J_L = 0,22 - 0,5$ м/с.

На рис. 2 показана визуализация течения смеси этанол-CO₂ в начале (в области формирования течения), в середине и на выходе канала. Уменьшение размера пузыря вдоль длины канала происходит вследствие растворения газа в жидкости (физическая

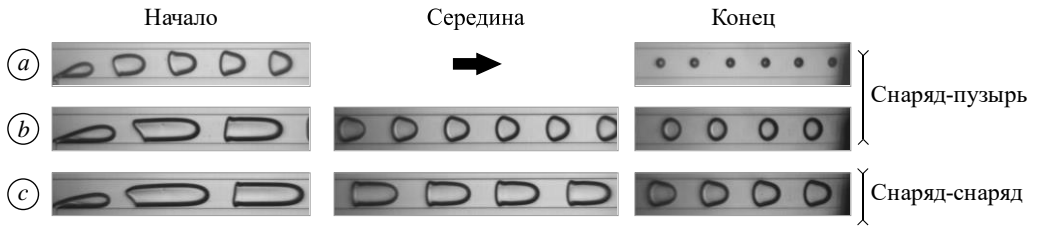


Рис. 2. Фотографии течения смеси этанол- CO_2 в прямоугольном микроканале для приведенных скоростей $J_L = 0,4$, $J_G = 0,4$ м/с (а), $J_L = 0,3$ м/с, $J_G = 0,55$ м/с (б), $J_L = 0,3$ м/с, $J_G = 0,71$ м/с (с) в начале, середине и конце канала соответственно. Направление течения указано стрелкой.

абсорбция). Данные визуализации соответствуют характерным сценариям течения в микроканале: переход от снарядного течения к пузырьковому (С-П) (см. рис. 2а, 2б), когда в начале канала наблюдается снаряд ($L_{\text{bub}} > w$), а в конце — пузырь ($L_{\text{bub}} < w$), и снарядное течение (С-С) (см. рис. 2с), когда в начале и в конце канала длина снарядов составляет $L_{\text{bub}} > w$. Полученные изображения обрабатывались программой DMV и измерялись статистические характеристики течения, такие как скорость газовых пузырей U_{bub} , их площадь, частота формирования f_{bub} и др. Зависимости скоростей газовых снарядов и пузырей в начале и конце канала U_{bub} от приведенной скорости смеси представлены на рис. 3. Скорость газового пузыря U_{bub} определяется приведенной скоростью смеси следующим образом: $U_{\text{bub}} = C(J_L + J_G)$, где C — параметр распределения. Как видно, параметр распределения в микроканале слабо отличается для начала канала (рис. 3а, $C = 1,25$) и для конца канала (рис. 3б, $C = 1,27$). Параметры распределения получены с пересчетом приведенной скорости газа $J_{G_{\text{in}}}$ с учетом ее уменьшения из-за абсорбированной части газа при формировании газового пузыря в начале канала и приведенной скорости $J_{G_{\text{out}}}$ с учетом абсорбции по длине канала. Скорости газовых пузырей используются далее для определения величины капиллярного числа $Ca = U_{\text{bub}}\mu/\sigma$.

Объем снаряда определялся в предположении равномерной толщины пленки жидкости δ вдоль длинной стороны канала, определенной по закону Тейлора [30], по методике,

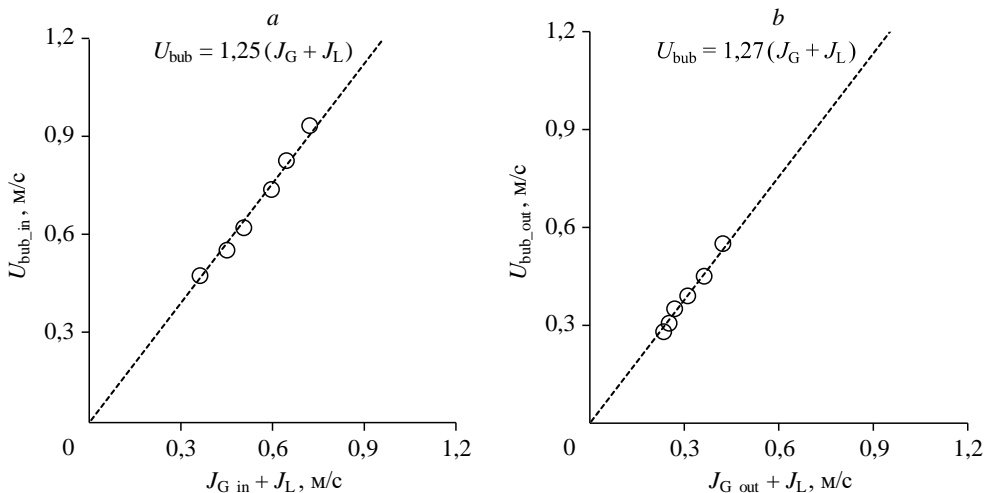


Рис. 3. Зависимости скоростей газовых снарядов и пузырей от приведенной скорости смеси на расстоянии 3 мм от смесителя (а) и 4 мм от выхода канала (б) для $J_L = 0,22$ м/с.

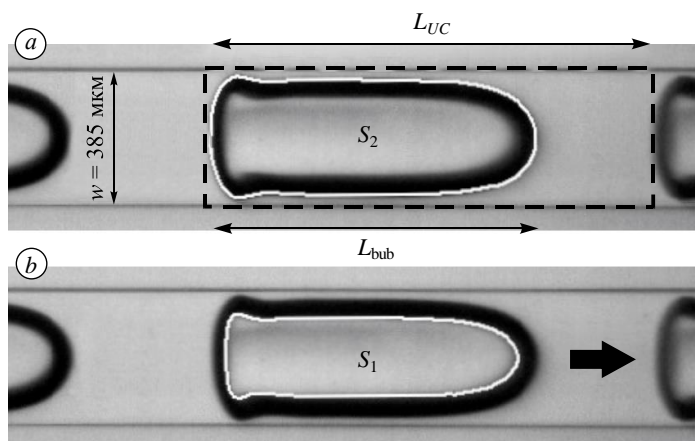


Рис. 4. Методика измерения объема газового пузыря: измеряемый контур внешней границы пузыря S_2 (a) и внутренней границы пузыря S_1 (b). Направление течения указано стрелкой.

описанной в работе [24]. Площади газового снаряда по внешнему (S_2) и внутреннему S_1 контурам, показанным на рис. 4, измерялись для количества не менее 100 пузырей в рамках одного режима, и итоговая формула для определения объема снаряда выглядела следующим образом: $V_{\text{bub}} = S_1(h - 2\delta) + (S_2 - S_1)(h - 2\delta)k$. Использование рассматриваемой методики показало, что отклонение объемного расхода, определенного с использованием величины объема пузыря по видеосъемке и частоты, не превышало 10 % от объемного расхода, определенного контроллером, для всего диапазона измерений.

Межфазный массообмен при абсорбции CO_2 в этаноле

В работе экспериментально получено среднее значение коэффициента массоотдачи, определенное по изменению объема пузыря на длине канала, т.е. с использованием измеренного объема пузыря на расстоянии 2–3 мм после смесителя и на расстоянии 4 мм от выхода из микроканала. Для определения объемного коэффициента массоотдачи $k_L a$ при растворении углекислого газа в этаноле применялось балансовое уравнение $V_{\text{slug}} = V_{\text{UC}} - V_{\text{bub}}$ для учета изменения концентрации газа в жидкости в рамках элементарной ячейки объемом $V_{\text{UC}} = L_{\text{UC}} \cdot w \cdot h$, показанной на рис. 4. В предположении однородной концентрации растворенного газа в жидкой перемычке и пленке жидкости объемом V_{slug} уравнение для изменения концентрации растворенного газа записывается следующим образом:

$$k_L a = \frac{J_L}{L_{\text{chan}}} \ln \left(\frac{C_* - C_{\text{in}}}{C_* - C_{\text{out}}} \right), \quad (1)$$

где L_{chan} — длина канала, на которой происходила регистрация массообмена, C_{in} , C_{out} — концентрации растворенного газа в жидкости в рамках элементарной ячейки после формирования снаряда и в конце канала, C_* — равновесная концентрация растворенного газа. Равновесная концентрация CO_2 в 90 %-м растворе этанола для условий эксперимента составила 81,1 моль/м³ [18].

Для определения начальной концентрации растворенного газа учитывалось интенсивное растворение в области формирования снарядов в смесителе. В смеситель подавался этанол с нулевой начальной концентрацией углекислого газа. Концентрация растворенного газа в жидкой перемычке в начале участка измерения массоотдачи определялась с помощью измерений расхода газа, выполненных контроллером до смесителя, частоты следования и среднего размера снарядов на расстоянии 2–3 мм от смесителя:

$$C_{in} = \frac{v_0 - v_{in}}{V_{slug}}, \quad (2)$$

где v_0 , v_{in} — количество молей в снаряде, определенное по измеренному расходу соответственно до и после смесителя по формуле $v_i = P_i V_{bub,i} / RT$, где V_{slug} — средний объем жидкости в рамках элементарной ячейки, определенный путем регистрации в начале и конце канала. Процент растворения газа при формировании снаряда от изначально поданного с контроллера увеличивался при возрастании приведенной скорости жидкости и не превышал 20 % для указанного диапазона скоростей. Концентрация растворенного газа в конце участка измерения массоотдачи C_{out} на расстоянии 4 мм от выхода из микроканала определяется таким же образом.

На рис. 5 представлена зависимость объемного коэффициента массоотдачи $k_L a$, рассчитанного по формуле (1), от приведенной скорости газа для различных приведенных скоростей жидкости. Видно, что для снарядного режима течения, отмеченного на графике темными маркерами, характерно увеличение коэффициента массоотдачи при возрастании приведенной скорости газа. Это наблюдалось также ранее в работе [18]. Такой эффект можно объяснить увеличением циркуляции в перемычке жидкости. При переходе от снарядного к пузырьковому режиму течения (светлые маркеры) значения объемных коэффициентов массоотдачи больше, чем для снарядного течения, что свидетельствует о более интенсивном перемешивании в жидкой перемычке.

На рис. 6 приведено сравнение измеренных значений объемного коэффициента массоотдачи для абсорбции CO_2 с расчетом по корреляционной зависимости из работы [1]:

$$Sh_L \cdot a \cdot d_h = 0,084 Re_G^{0,213} Re_L^{0,937} Sc_L^{0,5}. \quad (3)$$

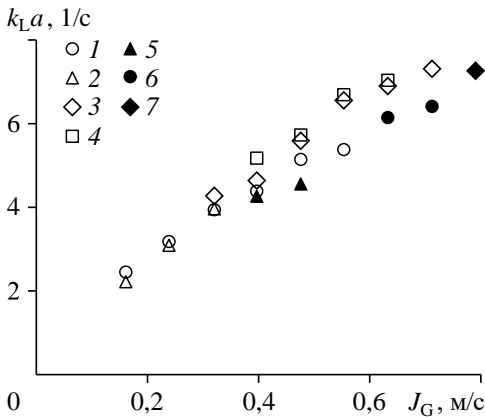


Рис. 5. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от приведенной скорости газа для разных скоростей по жидкости.

Переход от снарядного к пузырьковому режиму течения при $J_L = 0,22$ (1), 0,3 (2), 0,4 (3), 0,5 (4) м/с; снарядный режим течения при $J_L = 0,22$ (5), 0,3 (6), 0,4 (7) м/с.

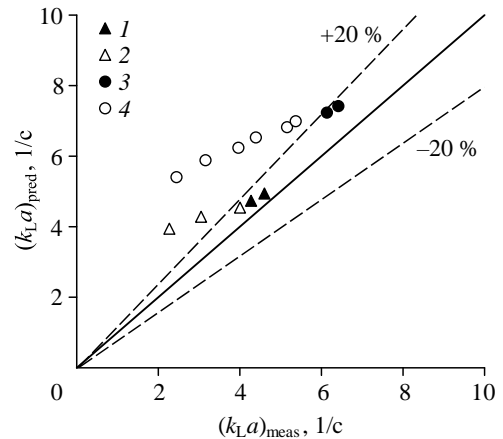


Рис. 6. Сравнение экспериментально полученного значения объемного коэффициента массоотдачи $k_L a$ с рассчитанным по корреляции (3).

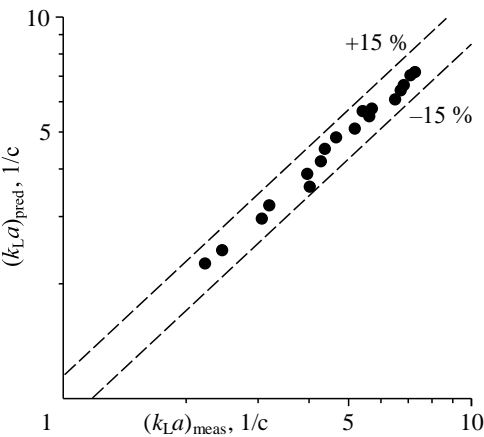
Снарядный режим при $J_L = 0,22$ (1), 0,3 (3) м/с; переход от снарядного к пузырьковому режиму при $J_L = 0,22$ (2), 0,3 (4) м/с.

Эта зависимость обобщает экспериментальные данные для снарядного течения смеси CO₂-вода в канале прямоугольного сечения 0,5×1 мм² с Y-образным входом. Измерения объемного коэффициента массоотдачи проводились в работе [1] для диапазона приведенных скоростей газа и жидкости ($J_G = 0,73 - 3$ м/с и $J_L = 0,1 - 1$ м/с) при титровании раствора на выходе. Как видно, корреляция (3) хорошо предсказывает объемные коэффициенты массообмена для снарядного режима течения (С-С), отмеченные на графике темными маркерами, что свидетельствует о верификации метода измерения $k_L a$ по определению изменения объема газовых пузырей. В то же время указанная выше корреляция не обобщает данных для перехода от снарядного к пузырьковому режиму течения (С-П, светлые маркеры), так как происходит смена механизма массообмена в микроканале.

При переходе от снарядного к пузырьковому течению наблюдается более слабая зависимость объемного коэффициента массоотдачи $k_L a$ от приведенной скорости жидкости J_L . На основе экспериментальных данных для перехода от снарядного к пузырьковому течению была предложена новая корреляция для расчета объемного коэффициента массоотдачи. Использовался алгоритм Левенберга – Марквардта в программном пакете OriginPro 9 при подборе коэффициента k и степеней a, b, c для корреляции вида $Sh_L \cdot a \cdot d_h = k Re_G^a Re_L^b Sc_L^c$. Так как в настоящей работе используется один тип жидкости, то степень числа Sc_L выбиралась на основе [1] и составила $c = 0,5$. Все безразмерные параметры рассчитывались из начальных условий и расходов фаз. Полученная корреляция для перехода от снарядного к пузырьковому режиму течения имеет следующий вид для скорректированного коэффициента детерминации $R^2 = 0,98$:

$$Sh_L \cdot a \cdot d_h = 0,21 Re_G^{0,68} Re_L^{0,24} Sc_L^{0,5}. \quad (4)$$

Существенное отличие в показателях степеней корреляций (3) и (4) соответствует смене механизма абсорбции, который реализуется при переходе от снарядного к пузырьковому режиму течения, поэтому полученные данные для рассматриваемых условий не обобщаются зависимостью (3). Сопоставление экспериментальных данных, полученных для перехода от снарядного к пузырьковому течению, с результатами расчетов по формуле (4) показано на рис. 7. Как видно, наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных.



Закключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования структуры газожидкостного течения и межфазного массообмена при переходе от снарядного к пузырьковому течению для смеси этанол-CO₂ в горизонтальном прямом

Рис. 7. Сравнение экспериментально полученного объемного коэффициента массоотдачи $k_L a$ от предсказанного по предложенной корреляции (4).

микроканале сечением $141 \times 385 \text{ мкм}^2$. Эксперименты проведены для периодического снарядного режима и перехода от снарядного к пузырьковому течению в диапазоне приведенных скоростей $J_G = 0,16 - 0,8 \text{ м/с}$, $J_L = 0,22 - 0,5 \text{ м/с}$. Данные о скорости снарядов, пузырей и изменений их объема при абсорбции были использованы для определения объемного коэффициента массоотдачи. Для снарядного течения получено хорошее совпадение результатов измеренного объемного коэффициента массоотдачи с расчетными данными по известному уравнению. Установлено, что коэффициент массообмена для перехода от снарядного к пузырьковому течению превышает его значение для снарядного течения и определяется приведенной скоростью газа. Это связано с тем, что при переходе от снарядного к пузырьковому течению происходит смена механизма массообмена. Для такого течения предложена новая корреляция, хорошо обобщающая экспериментальные данные, полученные в микроканале прямоугольного сечения.

Обозначения

L — длина, м,	S — площадь м^2 ,
d — диаметр, м,	ν — количество молей вещества, моль,
h, w — высота и ширина микроканала, м,	C_i — концентрация CO_2 в жидкости, моль/ м^3 ,
J — приведенная скорость, м/с,	C_* — равновесная концентрация CO_2 в жидкости, моль/ м^3 ,
U — скорость, м/с,	D_{diff} — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$,
Q — объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$,	k_L — поверхностный коэффициент массоотдачи со стороны жидкости, м/с,
P — давление, Па,	a — удельная поверхность контакта фаз, $\text{м}^2/\text{м}^3$,
R — газовая постоянная, Дж/(моль·К),	$k_{L,a}$ — объемный коэффициент массоотдачи со стороны жидкости, 1/с.
T — температура, К,	
V — объем, м^3 ,	
f — частота генерации пузырей, Гц,	

Безразмерные комплексы

$Ca = U_{\text{bub}} \mu / \sigma$ — капиллярное число,	$Sc_L = \mu_L / (\rho_L D_{\text{diff}})$ — число Шмидта,
$Re_{L,G} = \frac{d_h \cdot J_{L,G} \cdot \rho_{L,G}}{\mu_{L,G}}$ — число Рейнольдса,	$Sh_L = k_L d_h / D_{\text{diff}}$ — число Шервуда,
	$C = U_{\text{bub}} / (J_L + J_G)$ — коэффициент распределения.

Греческие символы

δ — толщина пленки жидкости, м,	σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.
μ — динамическая вязкость, кг/(с·м),	

Индексы

L — жидкость,	slug — перемычка жидкости,
G — газ,	bub — пузырь,
UC — элементарная ячейка,	chan — канал,
0 — начальный,	meas — измеренный,
in — входное значение,	pred — предсказанный по корреляции,
out — выходное значение,	h — гидравлический.

Список литературы

1. Yue J., Chen G., Yuan Q., Luo L., Gonthier Y. Hydrodynamics and mass transfer characteristics in gas-liquid flow through a rectangular microchannel // Chem. Eng. Sci. 2007. Vol. 62, No. 7. P. 2096–2108.
2. Günther A., Jensen K.F. Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis // Lab. Chip. – The Royal Soc. of Chemistry. 2006. Vol. 6, No. 12. P. 1487–1503.
3. Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В. Экспериментальное исследование дисперсных потоков в микроканалах для 3D-печати композитных материалов // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 6. С. 965–972.
4. Shamirzaev A.S., Mordovskoi A.S., Kuznetsov V.V. Heat transfer during flow boiling of water in short micro-channel with high aspect ratio // J. Eng. Thermophys. 2021. Vol. 30, No. 2. P. 200–206.

5. Aghel B., Heidaryan E., Sahraie S., Mir S. Application of the microchannel reactor to carbon dioxide absorption // J. Clean. Prod. 2019. Vol. 231. P. 723–732.
6. Cheng H., Fan Y., Tarlet D., Luo L., Fan Z. Microfluidic-based chemical absorption technology for CO₂ capture: Mass transfer dynamics, operating factors and performance intensification // Renew. Sustain. Energy Rev. 2023. Vol. 181. P. 113357–1–113357–47.
7. Fries D.M., Rudolf von Rohr P. Impact of inlet design on mass transfer in gas–liquid rectangular microchannels // Microfluid. Nanofluidics. 2009. Vol. 6, No. 1. P. 27–35.
8. Bartkus G.V., Kuznetsov V.V. Experimental study of gas-liquid flow patterns in slit channel with cross-junction mixer // J. Eng. Thermophys. 2021. Vol. 30, No. 1. P. 14–18.
9. Роньшин Ф.В., Дементьев Ю.А., Кочкин Д.Ю., Чиннов Е.А. Влияние высоты канала на характеристики двухфазного течения в мини- и микроканалах с Т-смесителем // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 5. С. 815–828.
10. Fries D.M., Trachsel F., von Rohr P.R. Segmented gas–liquid flow characterization in rectangular microchannels // Intern. J. Multiph. Flow. 2008. Vol. 34, No. 12. P. 1108–1118.
11. Bartkus G.V., Kovalev A.V., Yagodnitsyna A.A. Influence of low-frequency external pulsations of liquid flow rate on gas-liquid slug flow in a rectangular microchannel // Interfacial Phenom. Heat Transf. — Begel House Inc. 2023. Vol. 11, No. 1. P. 1–9.
12. Abiev R., Svetlov S., Haase S. Hydrodynamics and mass transfer of gas-liquid and liquid-liquid Taylor flow in microchannels // Chem. Eng. Technol. 2017. Vol. 40, No. 11. P. 1985–1998.
13. Li C., Zhu C., Ma Y., Liu D., Gao X. Experimental study on volumetric mass transfer coefficient of CO₂ absorption into MEA aqueous solution in a rectangular microchannel reactor // Intern. J. Heat Mass Transf. 2014. Vol. 78. P. 1055–1059.
14. Yang L., Loubière K., Dietrich N., Le Men C., Gourdon C., Hébrard G. Local investigations on the gas-liquid mass transfer around Taylor bubbles flowing in a meandering millimetric square channel // Chem. Eng. Sci. 2017. Vol. 165. P. 192–203.
15. Yin Y., Guo R., Zhu C., Fu T., Ma Y. Enhancement of gas-liquid mass transfer in microchannels by rectangular baffles // Sep. Purif. Technol. 2020. Vol. 236. P. 116306–1–116306–8.
16. Zhang S., Zhu C., Feng H., Fu T., Ma Y. Intensification of gas-liquid two-phase flow and mass transfer in microchannels by sudden expansions // Chem. Eng. Sci. 2021. Vol. 229. P. 116040–1–116040–9.
17. Butler C., Lalanne B., Sandmann K., Cid E., Billet A.-M. Mass transfer in Taylor flow: Transfer rate modelling from measurements at the slug and film scale // Intern. J. Multiph. Flow. 2018. Vol. 105. P. 185–201.
18. Yao C., Dong Z., Zhao Y., Chen G. An online method to measure mass transfer of slug flow in a microchannel // Chem. Eng. Sci. 2014. Vol. 112. P. 15–24.
19. Ji X.Y., Ma Y.G., Fu T.T., Zhu C.H., Wang D.J. Experimental investigation of the liquid volumetric mass transfer coefficient for upward gas-liquid two-phase flow in rectangular microchannels // Braz. J. Chem. Eng. SciELO Brasil, 2010. Vol. 27, No. 4. P. 573–582.
20. Van Baten J.M., Krishna R. CFD simulations of mass transfer from Taylor bubbles rising in circular capillaries // Chem. Eng. Sci. 2004. Vol. 59, No. 12. P. 2535–2545.
21. Butler C., Cid E., Billet A.-M. Modelling of mass transfer in Taylor flow: Investigation with the PLIF-I technique // Chem. Eng. Res. Des. 2016. Vol. 115. P. 292–302.
22. Nirmal G.M., Leary T.F., Ramachandran A. Mass transfer dynamics in the dissolution of Taylor bubbles // Soft Matter. The Royal Society of Chemistry, 2019. Vol. 15, No. 13. P. 2746–2756.
23. Abiev R.Sh. Gas-liquid and gas-liquid-solid mass transfer model for Taylor flow in micro (milli) channels: A theoretical approach and experimental proof // Chem. Eng. J. Adv. 2020. Vol. 4. P. 100065–1–100065–23.
24. Барткус Г.В., Филатов Н.А., Букатин А.С., Кузнецов В.В. Экспериментальное исследование межфазного массообмена при снарядном течении смеси этанол–CO₂ в прямоугольном микроканале // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 3. С. 503–515.
25. Yang L., Tan J., Wang K., Luo G. Mass transfer characteristics of bubbly flow in microchannels // Chem. Eng. Sci. 2014. Vol. 109. P. 306–314.
26. Варграфтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 р.
27. Basu A.S. Droplet morphometry and velocimetry (DMV): a video processing software for time-resolved, label-free tracking of droplet parameters // Lab. Chip. The Royal Soc. of Chemistry. 2013. Vol. 13, No. 10. P. 1892–1901.
28. Букатин А.С., Мухин И.С., Малышев Е.И., Кухтевич И.В., Евстапов А.А., Дубина М.В. Особенности формирования микроструктур с высоким аспектным соотношением при изготовлении полимерных микрофлюидных чипов для исследования единичных живых клеток in vitro // Журнал технической физики. 2016. 2016. Т. 61, вып. 10. С. 1566–1571.
29. Simons J., Pontar A.B. Diffusivity of carbon dioxide in ethanol-water mixtures // J. Chem. Eng. Jpn. — The Soc. Chem. Eng., Japan, 1975. Vol. 8, No. 5. P. 347–350.
30. Aussillous P., Quéré D. Quick deposition of a fluid on the wall of a tube // Phys. Fluids. — American Institute of Physics. 2000. Vol. 12, No. 10. P. 2367–2371.

*Статья поступила в редакцию 15 ноября 2023 г.,
после доработки — 7 октября 2023 г.,
принята к публикации 13 июня 2023 г.*