

УДК 532.5 : 66.021.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА В СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНКАХ ЖИДКОСТИ¹

А. А. Растатурин², Е. А. Демёхин³, А. С. Коровяковский⁴

INVESTIGATION OF MASS-TRANSFER IN FALLING LIQUID FILMS

Rastaturin A. A., Demekhin E. A., Korovyakovsky A. S.

The work considers gas absorption in the liquid film falling down along a vertical wall. Numerical solution for natural and excited waves is presented in the work. Calculated mass absorption was compared with experimental data and gave a good agreement for Reynolds number up to 60. Optimal frequencies of forced inlet disturbances to enhance mass transfer have been found for each Reynolds number. Main mechanisms of mass transfer were investigated.

Введение

Исследование тепломассообмена в пленках жидкости является одной из важных проблем гидромеханики и теплофизики. Интенсивное изучение этой проблемы связано с широким практическим применением пленок жидкости в технике и промышленности. Большая поверхность контакта при малых удельных расходах жидкости делают пленку жидкости весьма эффективным средством в процессах межфазного тепломассообмена. Несмотря на обширную сферу применения жидких пленок, многие вопросы, связанные с процессами переноса в волновых пленках, остаются открытыми. В первую очередь, это касается влияния волн на массоперенос. Практически всегда поверхность пленок покрыта волнами, которые оказывают существенное влияние на процессы межфазного переноса. Как следует из экспериментальных

работ [1,2], волновые режимы могут увеличивать массообмен от 100 % до 400 %.

В самых ранних моделях физической десорбции слабо растворимого газа в стекающей пленке ее поверхность считали гладкой, а время контакта фаз — малым, что привело к теории проникания Хигби [3]. Эксперименты и дальнейшие исследования показали, что в действительности коэффициенты массоотдачи для гладкой пленки принимают в несколько раз большие значения, чем предсказанные теорией. Возникло предположение о влиянии обнаруженных на ее поверхности волн на процесс переноса.

В работе [4] приведено объяснение интенсификации массообмена в ламинарно-волновой области чисто волновым механизмом (при небольших числах Рейнольдса). Рассматриваются длинные стационарные волны. В случае абсорбции слабо растворимого газа диффузионное число Пекле Pe велико, поэтому уравнение конвективной диффузии

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (05-08-33585).

²Растатурин Алексей Александрович, аспирант кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета.

³Демёхин Евгений Афанасиевич, д-р физ.-мат. наук, руководитель лаборатории природных процессов и сред Южного научного центра РАН.

⁴Коровяковский Александр Сергеевич, студент факультета прикладной математики Кубанского государственного университета.

записывается в приближении пограничного слоя. Так как пограничный слой очень тонкий, можно рассматривать плоский профиль скорости. Упрощенное решение уравнения в автомодельной форме можно получить при толщине диффузионного слоя $\delta \ll h$. Тогда в уравнении конвективной диффузии вместо профиля скоростей достаточно взять их значения на поверхности пленки. Вводится автомодельная переменная $\eta = y/\delta(x, \xi)$, уравнения для безразмерной концентрации и условной толщины диффузионного слоя разделяются. Решение первого уравнения записывается через интеграл ошибок, второе решается методом характеристик. Толщина диффузионного слоя резко уменьшается во впадинах, и именно здесь наблюдается локальный максимум потока массы. Если в какой-то точке поверхности скорость $U(x)$ достигнет значения фазовой скорости c , то пленка будет состоять из волновых ячеек, не зависящих друг от друга в диффузионном отношении. В общем случае произвольных периодических возмущений интенсификация массообмена на свободной поверхности определяется тремя факторами — скоростью, амплитудой и формой волны. В зависимости от соотношений между этими факторами различные волны могут по-разному влиять на коэффициенты массопереноса, причем как увеличивать их, так и уменьшать. В работе [4] было показано, что чем больше длина волны (и соответственно скорость и амплитуда), тем сильнее интенсифицируется массообмен. В рамках предложенной теории находит объяснение и факт уменьшения массоотдачи при разрушении двумерных периодических волн и превращении их в трехмерные нестационарные возмущения, поскольку при этом нарушается изолированность волновых ячеек. На больших расстояниях от начала участка отношение чисел Шервуда стремится к единице по экспоненциальному закону.

Данная теория справедлива лишь для тонких диффузионных слоев и при отсутствии на поверхности точек, где скорость волн равна скорости потока. Как показывают расчеты, почти при всех режимах течений существуют такие точки, в которых скорости жидкости и волны равны. Через них насыщенная жидкость с поверхности поступает внутрь волны и предположение о малой толщине диффузионного слоя оказывается неверным.

Некоторые исследователи делают вывод, что сильный эффект волн обусловлен перемешиванием. Модель полного перемешивания [1] основывается на этой идее. Предполагается, что внутри волны происходит полное перемешивание, и затем диффузионный слой начинает образовываться заново на длине волны. Вычисленный коэффициент массообмена обратно-пропорционален длине волны. Полученные результаты применимы только для синусоидальных волн.

В работе [5] проводились эксперименты по растворению кислорода в стекающей пленке воды. Представлены результаты экспериментов как для естественных режимов течений (без контролируемых возмущений), так и с контролируемыми возмущениями на входе, создающими двумерные регулярные волны на поверхности пленки. При этом появляется новый контролируемый параметр ω (частота колебаний). Показана зависимость массообмена от частоты и скорости двумерных волн. Впервые были найдены частоты волн для диапазона $Re = 15-53$, при которых достигается максимум массообмена. Указано на существование в гребне волны рециркуляции жидкости, а на поверхности волны — двух точек, в которых линии тока идут с поверхности пленки внутрь волны. Существующая циркуляция в горбе волны обновляет жидкость вблизи поверхности пленки, что увеличивает растворение газа в промежутке между горбами, и этот эффект монотонно усиливается с ростом высоты горба. Двумерные волны монотонно увеличивают этот эффект с увеличением высоты и скорости горбов. Показано, что частота волн, при которой достигается максимальное значение числа Шервуда, растет с увеличением числа Рейнольдса.

1. Постановка задачи и метод решения

Тонкая пленка вязкой жидкости стекает вниз по вертикальной стене. Для умеренных чисел Рейнольдса на поверхности пленки преобладают двумерные волны. Поэтому для расчетов была выбрана двумерная модель. Рассматривается абсорбция слаборастворимого газа в пленку. В этом случае основное сопротивление массообмена сосредоточено в жидкой фазе. Будем считать, что гидродинамика пленки не зависит от растворен-

ного в ней газа. Тогда задачу моделирования массообмена можно разделить на две — расчет гидродинамических параметров течения пленки и расчет массообмена на полученном профиле скоростей.

1.1. Гидродинамика

В длинноволновом приближении для тонких пленок гидродинамику можно описать системой Капицы-Шкадова [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{6}{5} \frac{\partial}{\partial x} \frac{q^2}{h} &= \\ &= Weh \frac{\partial^3 h}{\partial x^3} + \frac{3}{Re} \left(h - \frac{q}{h^2} \right), \quad (1) \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} &= 0, \end{aligned}$$

где $Re = q_0/\nu$ — число Рейнольдса, $We = \rho q_0^2/\sigma h_0$ — число Вебера, $h(x, t)$ — толщина пленки, ρ — плотность, σ — поверхностное натяжение, $q = \int_0^h u dy$ локальный поток, ν — кинематическая вязкость. Данная система известна как хорошее приближение для тонких пленок жидкости при умеренных числах Рейнольдса [1, 7].

Система решается со следующими краевыми условиями:

$$\begin{aligned} x = 0 : \quad h &= 1, q = 1 + F(t), \\ x = L : \quad \frac{\partial h}{\partial x} &= 0, \quad \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0, \end{aligned}$$

где L — длина рабочего участка, $F(t)$ моделирует возмущения на входе.

Используется два типа таких возмущений:

а) естественные волны, моделируемые случайными колебаниями (белый шум) [7]

$$\begin{aligned} F(t) &= \epsilon \int_{-\infty}^{\infty} \hat{F}(\omega) \exp^{-i\omega t} d\omega, \\ \hat{F}(-\omega) &= \hat{F}(\omega)^*, \end{aligned}$$

$\hat{F}(\omega) = |\hat{F}| \exp^{i\theta}$, $|\hat{F}| = const$, θ — случайное число, $\theta \in [0, 2\pi]$;

б) вынужденные волны, моделируемые периодическими осцилляциями

$$F(t) = a \cos \omega t,$$

ω — частота, a — амплитуда колебаний.

Естественные волны образуются в результате развития подаваемого на входе участка шума.

Вынужденные волны образуются вблизи начала рабочего участка из наложенных осцилляций и соответствуют их частоте.

1.2. Массообмен

Массообмен в пленке описывается уравнением [9]

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right),$$

где $Pe = q_0/D$ — число Пекле, $c = (\tilde{c} - c_0)/(c_s - c_0)$ — нормированная концентрация, $\tilde{c}$ — текущая концентрация, c_0 — концентрация на входе, c_s — на поверхности пленки, D — коэффициент диффузии, u, v — компоненты скорости.

Краевые условия

$$\begin{aligned} y = h(x, t) : \quad c &= 1, \\ y = 0 : \quad \frac{\partial c}{\partial y} &= 0, \\ x = 0 : \quad c &= 0. \end{aligned}$$

На конце участка концентрация неизвестна. При большой длине массообменного участка можно считать, что концентрация в конце участка меняется мало. Будем брать «мягкое» краевое условие, влияние которого затухает вверх по потоку на длине порядка длины волны

$$x = L : \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0.$$

Для определения величины массообмена используется число Шервуда, которое определяется, как

$$Sh = \frac{k_L \delta}{D},$$

где δ — средняя толщина пленки, k_L — коэффициент массообмена жидкой фазы, определяемый по средне-логарифмической разности концентраций [10]

$$k_L = \frac{q}{L} \ln \frac{c_s - c_0}{c_s - c_L},$$

c_L — среднепоточная концентрация газа на расстоянии L от входа.

Для определения явного влияния волн на массообмен будем рассматривать отношение

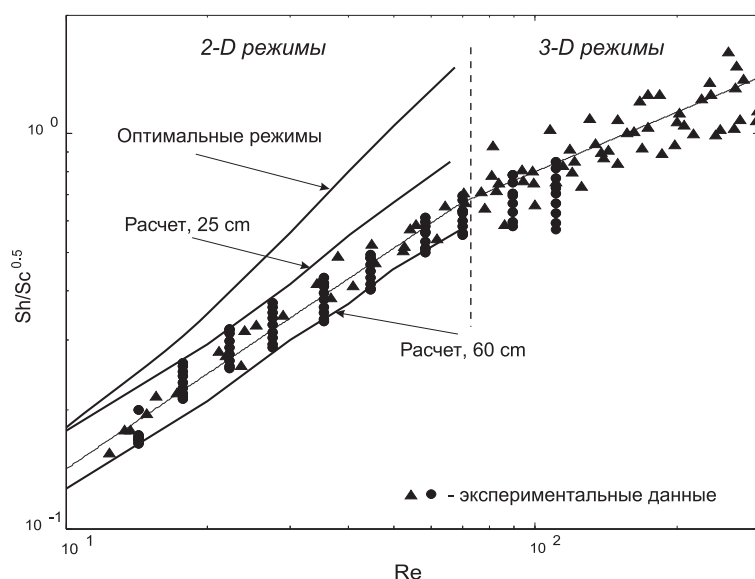


Рис. 1. Массообмен для естественных и возбужденных волн, оптимальные режимы

Sh/Sh_0 , где Sh_0 — число Шервуда, полученное для плоской пленки при тех же параметрах установки.

Для решения гидродинамической задачи используется метод, описанный в [7,8]. Задачи массообмена решаются численно, с помощью разностной схемы второго порядка точности.

2. Результаты

2.1. Естественные волны

Естественные волны образуются в результате развития подаваемого на входе участка случайного шума. В динамике этих волн можно выделить несколько характерных участков: от входа вытекает плоская пленка, затем из шумов возникают линейные волны с длиной волны, соответствующей длине максимального роста. Амплитуда волн растет, волны становятся нелинейными, начинают образовываться солитоны. Далее идет участок установившихся солитонов с рябью перед горбом и плоским участком между ними.

Рис. 1 иллюстрирует сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [2] (показаны круглыми маркерами) и множеством экспериментальных данных, собранных в работе [11] (показаны треугольными маркерами). Коэффициент массообмена увеличивается с ростом числа Рейнольдса и на экс-

периментальной кривой существует перелом при $Re^* \simeq 40 - 75$, где ее наклон уменьшается. Отметим разницу в динамике поверхностных волн при числах Рейнольдса $Re \simeq Re^*$. При этих числах Рейнольдса волны становятся трехмерными, таким образом, изменение в наклоне кривой можно связать с изменением волнового режима [1, 12].

Большинство экспериментальных работ были выполнены для длин канала от 25 см до 60 см, поэтому для вычислений выбраны две длины канала: 25 см и 60 см. Экспериментальные данные лежат между полученными линиями вплоть до чисел Рейнольдса 60. Следовательно, разброс данных связан, в первую очередь, с разной длиной канала.

Приведенная система описывает только двумерные режимы течения пленки, и разница между расчетами и экспериментами для $Re > Re^*$ связана с 2D–3D переходом.

2.2. Вынужденные волны

Пульсации расхода жидкости на входе радикально изменяют динамику поверхностных волн в пленке и, следовательно, массообмен. Волны образуются практически сразу у начала рабочего участка. Амплитуда быстро устанавливается, и пульсации переходят в регулярные стационарные периодические волны с частотой, соответствующей частоте колеба-

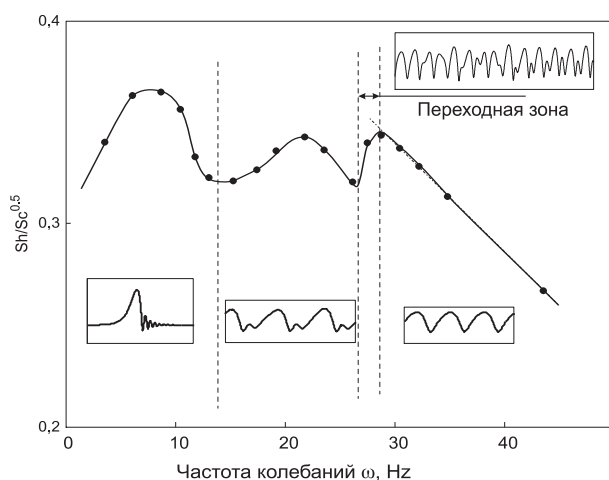


Рис. 2. Зависимость коэффициента интенсификации массообмена от частоты колебаний ($Re = 20$)

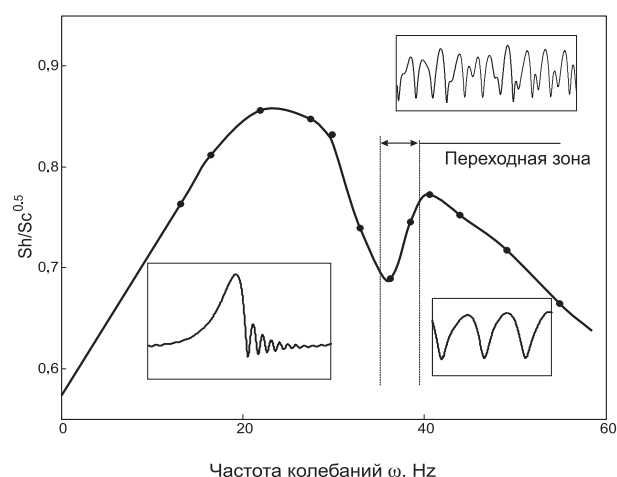


Рис. 3. Зависимость коэффициента интенсификации массообмена от частоты колебаний ($Re = 40$)

ний. Уровень начальных возбуждений сказывается только на длине зоны установления стационарных волн. Однако при очень малых начальных возмущениях доминируют естественно возникающие волны, которые развиваются из волн максимального роста.

Картина двумерных стационарных возбужденных волн при заданном числе Re определяется только частотой наложенных колебаний ω , т.е. волны на пленке принадлежат однопараметрическому семейству режимов [1, 8]. Высоким частотам соответствуют волны малых амплитуд, близкие по форме к синусоидам, низким частотам — крупноамплитудные длинные волны с крутым передним фронтом и осцилляциями перед ним.

На рис. 2, 3 показана зависимость массообмена от частоты колебаний на входе (дистанция $L = 25$ см, числа Рейнольдса 20 и 40). Для $Re = 20$ существует три максимума по частоте. Один — для волн, близких к синусоидальным, и два — для солитонов. Для волн, близких к синусоидальным, число Шервуда линейно уменьшается с увеличением частоты волн. Между двумя режимами существует переходный режим, где волны, близкие к синусоидальным, переходят в солитоны. С увеличением числа Рейнольдса один из максимумов исчезает и остается два максимума. Один — для режимов волн, близких к синусоидальным, и другой — для солитонов. Большой максимум — для солитонов. Здесь также существует переходный режим, где си-

нусоиды переходят в солитоны. Для каждого числа Рейнольдса существует частота волн, при которой достигается максимум коэффициента массоотдачи, причем эта частота для всех чисел Рейнольдса относится к третьему семейству (солитоны). Режим течения волн с этой частотой является оптимальным режимом для данного числа Рейнольдса (рис. 4).

Три максимума по частоте связаны с тремя механизмами массообмена:

а) при скорости волны, большей, чем поверхностная скорость течения жидкости, растворение газа происходит за счет диффузии и нормальной к поверхности составляющей скорости. Течение жидкости сносит растворенное вещество из впадин, где скорость минимальна, в гребни волн со скоростью потока, наиболее близкой к скорости волны. Здесь происходит накопление растворенного вещества. Максимум потока через поверхность достигается во впадинах, а минимум — на гребнях волн. Величина массообмена зависит от амплитуды и скорости волны;

б) на поверхности пленки существуют точки, где скорость волны меньше поверхностной скорости течения. Тогда на поверхности волны существуют точки, где скорость потока на поверхности равна скорости волны (точки покоя). При этом верхние, насыщенные газом слои, увлекаются под гребень волны, что приводит к перемещению насыщенного раствора газа вглубь пленки. Таким образом, растворенное вещество не скапливает-

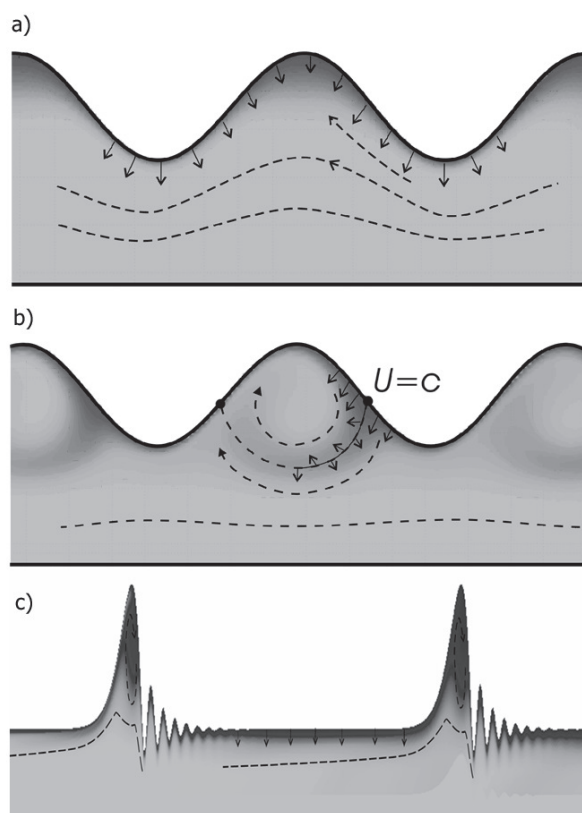


Рис. 4. Три механизма массообмена

ся у поверхности пленки, уменьшая растворение, а попадает вглубь потока. На обратной стороне волны существует области, в которой жидкость из глубины волны поступает на ее поверхность. При этом на поверхности создаются зоны с низкой концентрацией раствора газа, что резко увеличивает массообмен в этих местах. Такое увеличение тем сильнее, чем больше насыщенного раствора может попасть под горб волны, т. е. чем ниже находятся точки, в которых поток с поверхности направляется вглубь волны и чем больше ее амплитуда. При перемещении этих точек на вершину волны данный режим переходит в режим а);

с) для режима уединенных волн в горбах солитонов существуют вихревые движения жидкости, как и во втором режиме, но кроме этого, на массообмен оказывает влияние плоский участок пленки между солитонами. При прохождении волны концентрационный слой раствора перемешивается и в пленке снова начинает формироваться концентрационный пограничный слой.

Заключение

В работе впервые представлено численное решение двумерной задачи массообмена в волновой пленке жидкости, стекающей по вертикальной поверхности при развитии возмущений вниз по потоку. Модель дала хорошие количественные совпадения с экспериментальными данными. Для каждого числа Рейнольдса найдена оптимальная частота волн, при которой достигается максимум коэффициента массоотдачи, существенно превышающий коэффициент для естественных режимов. Изучены основные физические механизмы массообмена в волновых пленках жидкости. Найдены три существенно различных сценария массообмена.

Литература

1. Алексеенко С. В., Накоряков В. Е., Покусавев Б. Г. Влияние волн на процессы переноса //

- Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. С. 191–207.
2. *Накоряков В. Е., Покусев Б. Г., Радев К. Б.* Влияние волн на конвективную диффузию газа в стекающей пленке жидкости // Гидродинамика и тепломассообмен течений жидкости со свободной поверхностью. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1985. С. 5–32.
 3. *Higbie R.* The rate of absorption of a pure gas in to a still liquid during short periods of exposure // Trans. AIChE Journal. 1935. V. 31. P. 365–389.
 4. *Гешев П. И., Латин А. М., Цвелодуб О. Ю.* Тепломассообмен в волновых стекающих пленках жидкости // Гидродинамика и тепломассообмен течений со свободной поверхностью. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1985. С. 102–119.
 5. *Yoshimura P. N., Nosoko T., Nagata T.* Enhancement of Mass Transfer into a Falling Laminar Liquid Film by Two-Dimensional Surface Waves // Some Experimental Observations and Modeling. Chem. Eng. Science. 1996. V. 51. No. 8. P. 1231–1240.
 6. *Шкадов В. Я.* К теории волновых течений тонкого слоя вязкой жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1968. № 2. С. 20–25.
 7. *Chang H.-C., Demekhin E. A., Kalaidin E. N.* A simulation of noise-driven wave dynamics on a falling film // AIChE Journal. 1996. V. 42. No. 6. P. 1553–1568.
 8. *Chang H.-C., Demekhin E. A.* Complex Wave Dynamics on Thin Films. Studies in Interface Science. Amsterdam: Elsevier, 2002. 412 p.
 9. *Шкадов В. Я., Холпанов Л. П.* Гидродинамика и теплообмен с поверхностью раздела. М.: Наука, 1990. С. 1–271.
 10. *Emmert R. E., Pigford R. L.* A study of gas absorption in a falling liquid films // Chem. Eng. Progress. 1954. V. 50. P. 87–93.
 11. *Bakopoulos A.* Liquid-side Controlled Mass Transfer in Wetted-wall Tubes // Ger. Chem. Eng. 1980. No. 3. P. 241–252.
 12. *Park C. D., Nosoko T.* Three-dimensional dynamics of waves on a falling film and associated mass transfer // AIChE Journal. 2003. V. 49. No. 11. P. 2715–2727.

Статья поступила 7 ноября 2005 г.

Кубанский государственный университет

Южный научный центр РАН

© Растатурин А. А., Демёхин Е. А., Коровяковский А. С., 2005