

УДК 630*866.1.002.6

Подоплелов Евгений Викторович,
к.к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: uch_sovet@angtu.ru

Петрушин Георгий Александрович,
обучающийся, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: georg.petrushin@yandex.ru

Петрушина Анна Дмитриевна,
обучающаяся, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: tut.ann4@yandex.ru

МАССООБМЕН В УСЛОВИЯХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

Podoplelov E.V., Petrushin G.A., Petrushina A.D.

MASS TRANSFER UNDER CONDITIONS OF HYDRODYNAMIC INSTABILITY OF A LIQUID SURFACE

Аннотация. В газожидкостных процессах при некоторых условиях в жидкости возможно возникновение конвективных токов, обычно ведущее к значительному повышению коэффициента массоотдачи. Явление неустойчивости поверхности жидкости позволяет значительно ускорить процесс межфазного переноса. В работе проведено исследование механизма поверхностной конвекции в системе газ-жидкость.

Ключевые слова: конвекция Релея-Бенара, термокапиллярная конвекция, газожидкостные процессы, абсорбция.

Abstract. In gas-liquid processes, under certain conditions, convective currents may arise in the liquid, usually leading to a significant increase in the mass transfer coefficient. The phenomenon of instability of the liquid surface makes it possible to significantly accelerate the process of interfacial transfer. The work carried out a study of the mechanism of surface convection in the gas-liquid system.

Keywords: Rayleigh-Benard convection, thermocapillary convection, gas-liquid processes, absorption.

При проведении процессов в системе газ-жидкость, например, в процессе жидкофазного хлорирования этилена, имеет место отвод теплоты реакции за счет испарительного охлаждения при температуре ниже температуры кипения. Как правило, испарительное охлаждение сопровождается явлениями гидродинамической неустойчивости пограничной плёнки жидкости. Гидродинамическая неустойчивость поверхности испарения объясняется конвекцией Релея-Бенара и термокапиллярной конвекцией (эффектом Марангони) [1] в тонком пограничном слое жидкости.

Известно, что любая система, в том числе система газ-жидкость, стремится перейти из неравновесного состояния в равновесное, при этом часто возникают структуры, которые ускоряют процесс перехода из неравновесного состояния в равновесное. Впервые такие структуры были обнаружены Г. Бенаром на поверхности тонкой плёнки

жидкости, равномерно подогреваемой снизу. Структура представляла собой слой циркуляционных ячеек (рис. 1). Внутри ячеек движение – ламинарное. Сверху ячейка имеет вид многоугольника. Ячеечная структура возникает при некотором критическом градиенте температур в плёнке жидкости. При увеличении градиента температуры движение ускоряется и при достижении некоторого критического значения ΔT движение становится турбулентным, при этом ячейки разрушаются. Возникновение таких ячеек приводит к снижению сопротивления пограничного слоя и ускорению перехода системы из неравновесного состояния в равновесное.

Причиной возникновения конвекции является температурный градиент плотности, возникающий по высоте плёнки жидкости. При равномерном нагревании снизу плёнки жидкости температура верхних слоёв оказывается ниже температуры в глубине плёнки.

Вследствие этого верхние слои имеют более высокую плотность. Под действием силы тяжести возникает конвекция, при которой верхние слои опускаются к нагреваемой поверхности, а нижние поднимаются вверх. При определённых условиях конвекция приобретает строго ячеичную структуру (рис. 2).

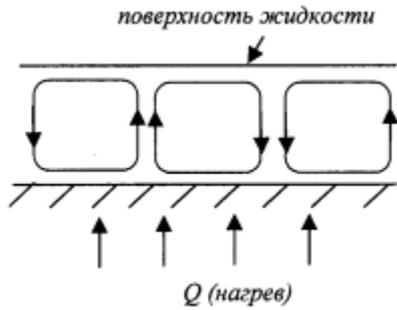


Рисунок 1 – Упорядоченная ячеичная структура конвекции Релея-Бенара

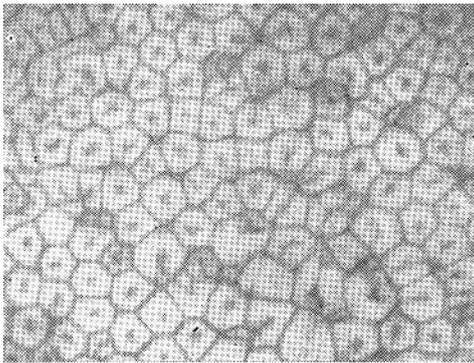


Рисунок 2 – Фотография ячеистого потока

Внутри ячеек (рис. 2) поток движется вверх, а по их периферии вниз. Свободная конвекция в слое жидкости возникает при значении критерия Релея (произведение критериев Грасгофа и Прандтля $Ra = Gr \cdot Pr$) $Ra \approx 1700$, а по более поздним исследованиям $Ra \approx 1500$. При числах Релея меньших 1700 движение жидкости отсутствует, и теплота переносится теплопроводностью. При числах Релея превышающих 4700 ячеистая структура поля потока разрушается, и режим движения становится турбулентным. Характер движения в ячейках зависит от вида корреляции между плотностью и температурой.

Упорядоченная структура из конвективных ячеек возникает, как правило, при больших движущих силах массо- и теплопередачи, когда велика разность температур или разность равновесной и рабочей концентраций [2].

Также при некоторых условиях в жидкости возможно возникновение конвективных токов в непосредственной близости к границе фаз, обычно ведущее к значительному повышению коэффициента массоотдачи в жидкости $\beta_{ж}$. Это явление, называемое также эффектом Марангони, является следствием неустойчивости поверхности, когда возникающие в жидкости случайные малые возмущения усиливаются. Явление неустойчивости Марангони позволяет существенно ускорить процесс межфазного переноса [1]. Большой частью поверхностная турбулентность связана с возникновением градиентов поверхностного натяжения; при этом поверхность стремится к состоянию с минимумом энергии, вызывая расширение области с низким поверхностным натяжением σ и сокращение области с высоким σ . Если с повышением концентрации компонента в жидкости σ возрастает, усиление малых возмущений приводит к спонтанному перемешиванию вблизи поверхности. Если же с повышением концентрации σ уменьшается, возмущения затухают.

Теоретический анализ показал [1], что возникновение неустойчивости поверхности зависит от соотношения вязкостей и соотношения коэффициентов диффузии для обеих фаз, а также от величины и от знака производной $d\sigma/dC$ и от направления массопередачи. Выделение тепла на границе фаз ведёт к стабилизации поверхности, а при его поглощении поверхность становится неустойчивой. При протекании химической реакции поверхность, стабильная в отсутствии реакции, может стать неустойчивой [1].

Поверхностную турбулентность можно описать посредством модели «вращающихся ячеек», изображённой на (рис. 3).

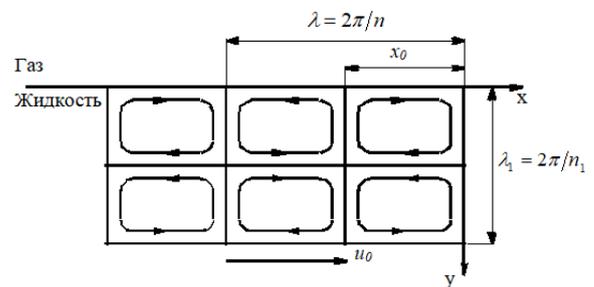


Рисунок 3 – Модель «вращающихся ячеек»

По этой модели (рис. 3) предполагается, что пульсации скорости доставляют вихри жидкости из основной её массы в некото-

рые области поверхности. При этом на поверхности появляются зоны с различным σ и возникает движение из зон с малым σ в зоны с большим σ , причём каждый элемент жидкости, достигающий поверхности, генерирует на последней движение в двух противоположных направлениях.

Для мгновенных скоростей вдоль осей x и y приняты выражения

$$u = u_0 [1 + A \sin n(x - \omega t)] \cos n_1 y;$$

$$v = -\frac{A n u_0}{n_1} \cos n(x - \omega t) \sin n_1 y,$$

где: u_0 – средняя скорость вдоль оси x ; A – амплитуда колебаний скорости; ω – скорость распространения волн; n и n_1 – волновые числа в направлениях x и y , причём связь волнового числа с длиной волны λ выражается:

$$n = 2\pi / \lambda.$$

Предложено, что $\omega = u_0$, а размеры ячеек вдоль соответствующих осей координат равны половине длины волны, так что $n = \pi / x_0$, где x_0 – длина ячейки в направлении оси x . При этих предположениях получено уравнение

$$2\rho_{ж} v_{ж}^{1/2} u_0^{3/2} \frac{A}{(\pi)^{1/2}} = |\Delta\sigma|,$$

в котором $|\Delta\sigma|$ – изменение σ на поверхности в пределах одной ячейки.

На основе модели Хигби найдено, что при возникновении поверхностной турбулентности $\beta_{ж}$ увеличивается в χ раз, причём χ является функцией безразмерной величины

$$\alpha = \frac{A n u_0}{D_{ж} n_1^2}.$$

Вид этой функции показан графически на (рис. 4).

Из приведённого анализа следует, что уменьшение длины волны в направлении x и увеличение её в направлении y ведёт к повышению χ вследствие более активного обновления элементов жидкости у границы и более глубокого проникновения в свежие области.

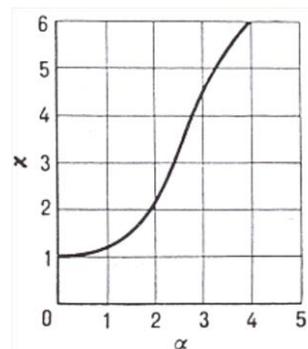


Рисунок 4 – Зависимость χ от α

Величина x_0 оценивается равной $10^{-3} - 10^{-4}$ м. В силу принятых допущений и произвольного выбора значения x_0 приведённые соотношения дают лишь грубо ориентировочные величины.

В процессах абсорбции поверхностную турбулентность наблюдали и исследовали при поглощении CO_2 растворами этаноламинов [3].

В этих опытах для определения $\beta_{ж}$ одновременно проводили десорбцию не реагирующего с поглотителем газа (C_3H_6 , N_2O , He , Xe). При нулевой концентрации CO_2 в газе найденная величина $\beta_{ж}$ соответствовала значению в отсутствие поверхностной турбулентности; с повышением концентрации CO_2 в газе $\beta_{ж}$ возрастал вследствие возникновения поверхностной турбулентности. Максимальное возрастание $\beta_{ж}$ составляло почти 10 раз (при концентрации моноэтаноламина около $1,5 \text{ кмоль/м}^3$ и 100%-ом содержании CO_2 в газовой фазе).

Можно полагать, что в условиях поверхностной турбулентности существенно меняется механизм переноса. Опыты показали [3], что $\beta_{ж}$ при этом не зависит от коэффициента диффузии $D_{ж}$ и от критерия $\text{Re}_{ж}$ (при $\text{Re}_{ж} < 1600$) и в то же время зависит от типа аппарата. Так, отмечается, что при барботаже поверхностная турбулентность проявляется слабее, чем при плёночном течении [3].

Таким образом, явление неустойчивости поверхности жидкости позволяет значительно ускорить процесс межфазного переноса в газожидкостных диффузионных процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Подоплелов, Е.В.** Математическое моделирование термогравитационной и термокапиллярной конвекции в газожидкостных процессах / Е.В. Подоплелов, А.В. Бальчугов, А.И. Дементьев, А.А. Готов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2021. – Т. 1. – № 18. С. 58-66.
2. **Podoplelov, E.V.** Simulation of the evaporation process of 1,2-dichloroethane into nitrogen / E.V. Podoplelov, A.V. Balchugov, A.I. Dementev, A.S. Ryabov // Journal of Physics: Conference Series. 13. "Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics". – 2020. – P. 012041.
3. **Шиляев, М.И.** Моделирование тепломассообмена при формировании пузырей в барботажных аппаратах / М.И. Шиляев, А.В. Толстых, А.Н. Деренок, Е.М. Хромова // Теор. основы хим. технологии. – 2003. – Т. 37. – № 6. – С. 575-583.

УДК 66.021.3

Подоплелов Евгений Викторович,
к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: uch_sovet@angtu.ru

Щербин Сергей Анатольевич,
к.т.н., доцент, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

Семенов Иван Александрович,
к.т.н., доцент, доцент кафедры «Химической технологии топлива»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: semenovia.chem@yandex.ru

Дементьев Анатолий Иванович,
к.т.н., доцент, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: anatdementev@mail.ru

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДЕСОРБЦИОННОЙ КОЛОННЫ
ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕРОВОДОРОДА ИЗ ФЕНОЛЬНО-СУЛЬФИДНОЙ ВОДЫ**

Podoplelov E.V., Scherbin S.A., Semenov I.A., Dement'ev A.I.

**EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A DESORPTION COLUMN FOR
THE EXTRACTION OF HYDROGEN SULFIDE FROM PHENOLIC SULFIDE WATER**

Аннотация. В работе на основании проверочных технологических расчетов произведена оценка эффективности работы десорбционной колонны для извлечения сероводорода из фенольно-сульфидной воды в цехе 86/57 производства нефтехимии АО «Ангарская нефтехимическая компания». По результатам расчетов сделан вывод о низкой эффективности установленных в колонне контактных устройств, и предложено мероприятие по повышению эффективности работы десорбционной колонны.

Ключевые слова: десорбция, сероводород, фенольно-сульфидная вода, контактные устройства, поверхность массопередачи.

Abstract. In this work, based on verification technological calculations, the efficiency of the desorption column for extracting hydrogen sulfide from phenol-sulfide water in workshop 86/57 of the petrochemical production of Angarsk Petrochemical Company JSC was assessed. Based on the calculation results, a conclusion was made about the low efficiency of the contact devices installed in the column, and measures were proposed to increase the efficiency of the desorption column.

Keywords: desorption, hydrogen sulfide, phenol-sulfide water, contact devices, mass transfer surface.

Процесс абсорбции находит широкое применение при получении готового продук-