

дачах: учебное пособие / Б. А. Ульянов, В. Я. Бадеников, В. Г. Ликучев. – Ангарск : АнгТУ, 2006. – 743 с.

4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – М. : Альянс, 2006. – 576 с.

5. Щербин, С. А. Технологический расчет и оценка эффективности факельного сепаратора высокого давления компрессорной станции Сузунского месторождения / С. А. Щербин, Е. В. Подоппелов, А. И. Дементьев // Вестник Ангарского гос. техн. университета. – 2018. – № 12. – С. 130–135.

6. Подоппелов, Е. В. Анализ эффективности работы факельного сепаратора вы-

сокого давления / Е. В. Подоппелов, С. А. Щербин, А. А. Глотов // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2022. – № 9. – С. 41–42.

7. Подоппелов, Е. В. Расчет длины зоны сепарации гравитационного газового сепаратора / Е. В. Подоппелов, А. И. Дементьев, Р. Д. Лойко // Сборник научных трудов Ангарского гос. техн. университета. – 2024. – № 21. – С. 136–139.

8. Подоппелов, Е. В. Моделирование горизонтального гравитационного газового сепаратора / Е. В. Подоппелов, А. И. Дементьев, Р. Д. Лойко // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2024. – № 11. – С. 56–57.

УДК 630*866.1.002.6

Подоппелов 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

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

Тикунова Наталья Сергеевна,

*обучающаяся, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: natalitikunova62459@gmail.com*

Лойко Руслан Дмитриевич,

*обучающийся, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: ryslanloik@mail.ru*

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ

Podoplelov E.V., Dementev A.I., Tikunova N.S., Loiko R.D.

METHODS OF INVESTIGATION OF SURFACE PHENOMENA IN GAS-LIQUID SYSTEMS

Аннотация. В работе рассмотрены методы исследования поверхностных явлений, позволяющие установить структуру и масштабы конвективных движений, их кинетические параметры. Исследование механизма поверхностной конвекции в системе газ-жидкость позволяет сделать вывод, что явление неустойчивости поверхности жидкости может значительно ускорить процесс межфазного переноса.

Ключевые слова: поверхностные явления, межфазный перенос, конвекция, оптические методы, гидродинамическая неустойчивость поверхности, газожидкостные системы, конвекция Рэлея-Бенара.

Abstract. The paper considers methods for studying surface phenomena that allow us to establish the structure and scale of convective movements, their kinetic parameters. The study of the mechanism of surface convection in the gas-liquid system allows us to conclude that the phenomenon of instability of the liquid surface can significantly accelerate the process of interphase transfer.

Keywords: surface phenomena, interphase transport, convection, optical methods, hydrodynamic instability of the surface, gas-liquid systems, Rayleigh-Benard convection.

Известно, что в ряде газожидкостных систем вблизи границы раздела фаз возникают интенсивные, конвективные движения, вызванные процессами межфазного обмена [1-6].

Для изучения особенностей межфазного переноса в системе газ-жидкость могут быть использованы различные оптические методы, в некоторых случаях исследования поверхности раздела фаз можно проводить визуально или теоретически с использованием математического моделирования.

Широко для исследования явлений на границе раздела фаз используется комплекс оптических методов: голографическая интерферометрия в режиме реального времени и поляризационная микроскопия, теневой метод и модифицированный метод спектроскопии поверхностных флуктуаций. Процессы межфазного обмена, протекающие достаточно интенсивно, сопровождаются возникновением и развитием фазовых и конвективных неоднородностей приповерхностного слоя жидкости вблизи границы раздела фаз. Гидродинамические неоднородности связаны с протеканием термокапиллярной конвекции и конвекции Релея-Бенара. Эти неоднородности имеют показатели преломления, отличающиеся от показателей преломления исходной жидкости, и могут быть обнаружены оптическими методами.

Для изучения механизмов процессов переноса вещества в системе газ-жидкость, представляющих собой физическую абсорбцию или десорбцию, используют оптический метод голографической интерферометрии, позволяющий проводить исследование в режиме реального времени. Экспериментальная установка (рисунок 1) включает гелий-неоновый лазер 1 мощностью 20 мВт и длиной волны 0,63 мкм. Световые пучки, выходящие из лазера, делятся на объектный и опорный. Опорный световой пучок, отразившись от зеркал 2, направляется на фоторегистратор - голографическую пластинку 5. На него также попадает и объектный световой пучок, который отражается от зеркал 2 и проходит через оптическую систему, состоящую из объективов 3 и кюветы 4. Последнюю заполняют исследуемой средой таким образом, чтобы в поле зрения видеокамеры 6 попадала межфазная граница и примыкающие к ней объемы газовой и жидкой фаз. Окна кюветы 4 изготовлены из прозрачного оптического стекла, что обеспечивает возмож-

ность наблюдения за поверхностью раздела газ-жидкость. До начала эксперимента кювету продувают инертным газом, затем частично заполняют исследуемой жидкостью. После достижения невозмущенного начального состояния инертный газ в кювете заменяют на абсорбируемый газ.

Визуально наблюдать диффузионно-реакционные процессы, локализованные в тонком слое вблизи межфазной поверхности, при хемосорбции газа жидкостью можно с помощью поляризационно-интерференционного микроскопа (рисунок 2). Оптическая система такого микроскопа позволяет увеличивать исследуемые неоднородности вблизи межфазной поверхности от 10 до 40 раз. Разрешение системы, исходя из числа линий на экране монитора, не менее 50 мкм. В поляризационно-интерференционном микроскопе формируется пучок когерентного света, который характеризуется разностью фаз из-за разделения при прохождении через призму 10. В плоскости изображения микроскопа размещена светочувствительная поверхность видеокамеры 12. Изображение выбранной области кюветы 7, в которой протекают межфазные процессы, подсвеченное с помощью осветительной системы микроскопа, включающей элементы 1-6, проецируется на чувствительную поверхность камеры 12 с помощью микрообъектива 8. Изображение, полученное с помощью камеры 12, регистрируется устройством 13 и воспроизводится на мониторе 14.

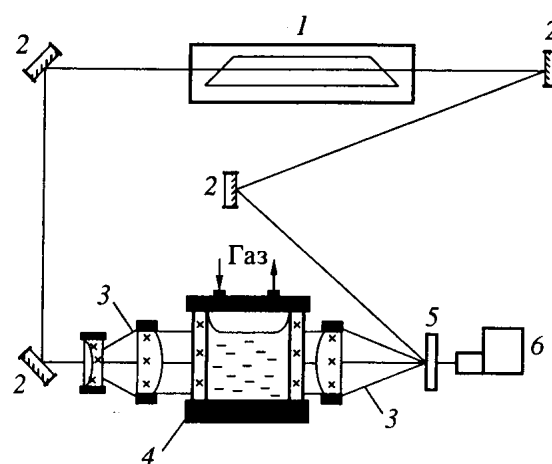


Рисунок 1 – Схема голографического интерферометра: 1 – гелий-неоновый лазер, 2 – зеркала, 3 – объективы, 4 – кювета, 5 – фоторегистратор, 6 – видеокамера

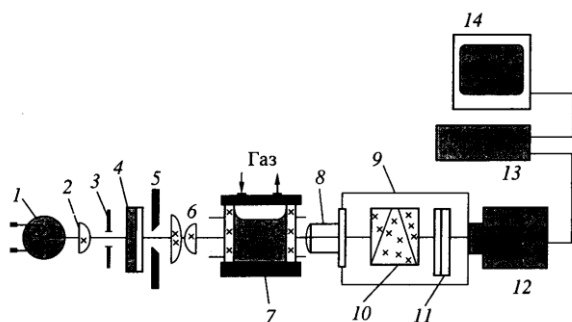


Рисунок 2 – Схема поляризационно-интерференционного микроскопа: 1 – лампа накаливания, 2 – линза, 3 – диафрагма, 4 – поляризатор, 5 – щелевая диафрагма, 6 – конденсор, 7 – кювета, 8 – микрообъектив, 9 – поляризационно-интерференционное устройство, 10 – призма, 11 – анализатор, 12 – видеокамера, 13 – видеорегистратор, 14 – монитор

Лазерная спектроскопия дает возможность идентификации межфазных неоднородностей. Схема устройства для исследования явлений, происходящих на самой межфазной границе, показана на рисунке 3.

Устройство работает следующим образом. Пучок излучений гелий-неонового лазера длиной волны 0,63 мкм направляется на межфазную поверхность жидкости с двух сторон, отражается от нее и попадает на экран. Отраженный пучок содержит информацию о структуре поверхностного слоя. Изображение пучка на экране фотографируют с интервалом 2-3 с.

Рассмотренные оптические методы позволяют установить структуру и масштабы конвективных движений, их кинетические параметры. В ряде простых случаев, когда конвективные образования крупны по размеру, поверхностные явления можно наблюдать и исследовать визуально, с помощью цифровой фотокамеры. В работе [7-9] визуализирована с помощью цифровой фотокамеры поверхностная термогравитационная конвекция при испарении горячей воды в воздух. Вихревые потоки, возникшие при сливании жидкости в кювету, затихали, и на поверхности жидкости возникала структура конвективных ячеек (рисунок 4). Рисунок из светлых линий на поверхности жидкости вызван зависимостью коэффициента преломления света от плотности и температуры жидкости. Светлые линии соответствуют жидкости с меньшей температурой, такая жидкость имеет большую плотность и опускается вниз.

Темные области соответствуют восходящему потоку жидкости. Ячейки имели вид многоугольников неправильной формы. Несомненно, в ячейках воды было ламинарное движение. На фотографии (рисунок 4, а) видно, что на границе двух ячеек возник вихрь. Это говорит о том, что при большой движущей силе испарения возможен переход ламинарного течения в турбулентное. На рисунке 4, б видно, как вихри деформируют ячейки, занимая господствующее положение. По мере охлаждения воды конвекция затухала.

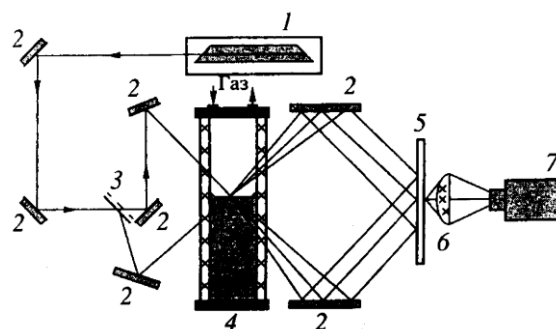


Рисунок 3 – Схема устройства для исследования межфазных явлений методом лазерной спектроскопии: 1 – гелий-неоновый лазер, 2 – зеркала, 3 – делитель лазерного пучка, 4 – кювета, 5 – матовый полупрозрачный экран, 6 – объектив, 7 – видеокамера

Исследование гидродинамической устойчивости поверхности можно осуществлять теоретически при помощи математического моделирования. В работах [10-11] установлена возможность возникновения поверхностной конвекции при испарении 1,2-дихлорэтана в азот. В результате расчетов по математической модели определено распределение температуры в пленке 1,2-дихлорэтана при испарительном охлаждении его в азот. Критический градиент температуры ΔT по высоте пленки жидкости, необходимый для возникновения термокапиллярной конвекции, обусловленной градиентом коэффициента поверхностного натяжения, определялся из следующей формулы:

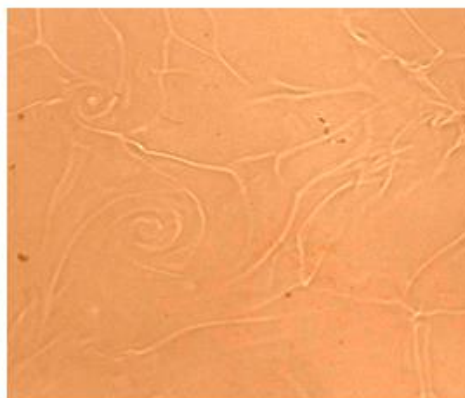
$$Ma = \frac{\Delta T \epsilon h^2}{\mu a}$$

где: Ma – безразмерное число Марангони, характеризующее соотношение термокапиллярной силы и вязкой силы; ΔT – критический градиент температуры по высоте пленки жидкости, град.; h – высота пленки жид-

кости, m ; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; a – коэффициент температуропроводности, m^2/s ; ε – температурный градиент поверхностного натяжения, Н/м².



а



б

Рисунок 4 – Конвекция Рэлея-Бенара на поверхности воды

Затем значение критического градиента температуры ΔT сравнивалось с разностью температур в пленке жидкости, рассчитанной по модели, и устанавливалась возможность возникновения термокапиллярной конвекции.

Поверхностные явления, имеющие место в газожидкостных системах, способны интенсифицировать межфазный перенос и оказывать существенное влияние на скорость массопереноса, поэтому актуальным направлением является исследование и визуализа-

ция поверхностных явлений, протекающих вблизи границы раздела фаз. В настоящее время существует большое разнообразие оптических методов, которые могут применяться для исследования межфазных явлений в газожидкостных системах. Однако для их успешного использования требуется экспериментальное оборудование, обладающее высокой временной и пространственной разрешающей способностью, а также большой степенью увеличения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гершуни, Г. З. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г. З. Гершуни, Е. М. Жуковичский. – Москва : Наука, 1972. – 392 с.
2. Гетлинг, А. В. Конвекция Рэлея-Бенара. Структуры и динамика / А. В. Гетлинг. – Москва : Эдиториал УРСС, 1999. – 248 с.
3. Подоплелов, Е. В. Поверхностные явления в газожидкостных химических процессах с большим тепловым эффектом / Е. В. Подоплелов, А. В. Бальчугов, В. Ю. Рахманин, А. В. Подоплелова // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-26). – 2013. – С. 59–61.
4. Подоплелов, Е. В. Гидродинамическая неустойчивость поверхности при испарении 1,2-дихлорэтана в азот / Е. В. Подоплелов, А. В. Бальчугов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 114–116.
5. Подоплелов, Е. В. Капиллярная конвекция при массообмене между газом и жидкостью в процессе получения 1,2-дихлорэтана / Е. В. Подоплелов, А. В. Бальчугов, Б. А. Ульянов, Д. П. Свиридов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2006. – Т. 1. – № 1. – С. 180–183.
6. Бальчугов, А. В. Визуализация конвекции Рэлея-Бенара на поверхности испаряющейся жидкости / А. В. Бальчугов, Е. В. Подоплелов, Б. А. Ульянов, Д. П. Свиридов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2005. – Т. 1. – № 1. – С. 24–27.
7. Бальчугов, А. В. Гидродинамиче-

ское состояние поверхности при испарении / А. В. Бальчугов, И. А. Семенов, Е. В. Подоппелов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2005. – Т. 1. – № 1. – С. 31–37.

8. **Бальчугов, А. В.** Массообмен при испарении жидкости в поток газа / А. В. Бальчугов, И. А. Семенов, Е. В. Подоппелов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2005. – Т. 1. – № 1. – С. 38–45.

9. **Дильман, В. В.** Диффузионно-тепловая неустойчивость Марангони при абсорбции с химической реакцией / В. В. Дильман, Н. Н. Кулов, В. И. Найденов // Теоретические основы химической технологии.

– 1999. – Т. 33. – №5. – С. 495.

10. **Подоппелов, Е. В.** Математическое моделирование термогравитационной и термокапиллярной конвекции в газожидкостных процессах / Е. В. Подоппелов, А. В. Бальчугов, А. И. Дементьев, А. А. Глотов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2021. – Т. 1. – № 18. – С. 58–66.

11. **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.

УДК 621.181

Подоппелов 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

Качан Константин Петрович,

обучающийся, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: kachan840@gmail.com

Петрушина Анна Дмитриевна,

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОМАЗУТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Podoplelov E.V., Kachan K.P., Petrushina A.D.

EFFICIENCY OF USING WATER-OIL EMULSIONS IN POWER PLANTS

Аннотация. В работе предлагается новая проточная схема получения водомазутной эмульсии с непрерывно действующим узлом смешения. Проведенные исследования процесса получения водомазутной эмульсии в аппарате с вибромешалкой подтвердили высокую эффективность диспергирования (дробления воды на микрокапли). Новая схема получения водомазутной эмульсии может быть использована в котельных и на ТЭЦ.

Ключевые слова: водомазутная эмульсия, способы диспергирования, аппарат с вибромешалкой, энергетические установки, топливо.

Abstract. The paper proposes a new flow-through scheme for producing a water-oil emulsion with a continuously operating mixing unit. The conducted studies of the process of obtaining a water-oil emulsion in an apparatus with a vibrating mixer confirmed the high efficiency of dispersion (crushing water into microdrops). The new scheme for producing a water-oil emulsion can be used in boiler houses and thermal power plants.

Keywords: oil-and-water emulsion, dispersion methods, apparatus with a vibrating mixer, power plants, fuel.

Одним из рациональных способов использования жидкого топлива в энергетических установках является сжигание его в виде эмульгированной смеси с водой. Термодинамический анализ процесса горения водотопливных эмульсий с содержанием воды

от 10 % до 30 %, при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ и температуре 1000-1500 К показал, что содержание CO, H₂, CH₄ в продуктах сгорания практически равно нулю, т.е. присутствие воды не снижает полноты сгорания мазута. Наличие воды в топливе при-