

Денис Сергеевич КЛЮЕВ¹
Наталья Анатольевна ИВАНОВА²

УДК 532.23

О КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СИСТЕМЕ ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ

¹ младший научный сотрудник,
научно-исследовательская лаборатория
фотоники и микрофлюидики, X-BIO,
Тюменский государственный университет
d.s.klyuev@utmn.ru; ORCID: 0000-0001-7018-2290

² кандидат физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры прикладной и технической физики,
Физико-технический институт;
заведующий научно-исследовательской лабораторией
фотоники и микрофлюидики, X-BIO,
Тюменский государственный университет
n.ivanova@utmn.ru; ORCID: 0000-0002-4121-8765

Аннотация

Современные методы управления формой межфазных поверхностей смешиваемых и несмешиваемых жидкостей, а также основанные на них технологии адаптивной жидкостной оптики, или так называемой оптики свободной формы, требуют глубокого понимания процессов тепло- и массопереноса, протекающих на границе раздела. Эти процессы оказывают значительное влияние на форму поверхности и скорость ее перехода в устойчивое состояние, что является определяющим критерием для аккомодации оптических характеристик жидкостной оптики. Целью данной работы является исследование основных режимов термокапиллярной конвекции в горизонтальной

Цитирование: Клюев Д. С. О колебательной неустойчивости в системе двух несмешиваемых жидкостей при локальном нагреве межфазной границы / Д. С. Клюев, Н. А. Иванова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 4 (28). С. 111-123.
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-111-123

системе двух несмешивающихся жидкостей. Причиной возникновения тепломассопереноса в изучаемой системе являлся локальный нагрев межфазной границы с помощью лазерного излучения. Методика получения информации об изменении кривизны поверхности слоя как о показателе гидродинамической устойчивости системы основана на измерении диаметра интерференционной картины, сформированной на удаленном экране отраженным от деформированной поверхности жидкости лазерным пучком. С помощью этого метода обнаружено, что для одной из рассматриваемых систем (бензиловый спирт — полиметилсилоксан) характерно возникновение гидродинамической неустойчивости колебательного характера, проявляющейся в изменении формы как межфазной границы между двумя жидкостями, так и свободной границы. Показаны отличительные особенности эволюции обнаруженной неустойчивости, выдвинуто предположение о влиянии микропузырьковых скоплений, выявленных методом оптической микроскопии, в качестве причины возникновения и затухания колебаний. Предполагается, что перемещение пузырьковых скоплений посредством термокапиллярных течений и капиллярного дрейфа способствует формированию локального перепада межфазного натяжения, приводящего к дестабилизации устойчивой деформации слоя и переходу системы в режим колебательной неустойчивости. Установлены времена затухания и периоды колебаний в зависимости от толщины верхнего слоя.

Ключевые слова

Термокапиллярные течения, конвекция, двухслойная система, нагрев лазером, газовые пузырьки, межфазная граница, деформация поверхности жидкости.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-111-123

Введение

Термокапиллярная (ТК) конвективная неустойчивость в двухслойных системах имеет большое значение в естественных процессах и производственных приложениях [15]. Большинство работ посвящено исследованию межфазной неустойчивости, возникающей в двухслойных жидкостных системах, ограниченных двумя жесткими стенками, где осуществляется нагрев нижней или верхней стенки [12, 15] либо непосредственно межфазной границы [6]. В зависимости от направления градиента температуры могут возникать различные типы неустойчивости в системе «жидкость — жидкость», вызванные конкуренцией между термогравитационным и термокапиллярным механизмами.

Системы «жидкость — жидкость» при наличии свободной поверхности верхнего слоя были исследованы в рамках решения проблемы инкапсуляции расплавов полупроводниковых материалов в условиях пониженной гравитации [9]. В работе [14] такую конфигурацию исследовали в качестве прототипа чувствительного преобразователя ИК излучения в видимое изображение. В этом случае деформацию верхнего слоя индуцировали нагревом границы «жидкость — жидкость» пространственно-модулированным инфракрасным лазерным пучком.

Натурное исследование формы свободной поверхности жидкостных систем является критически необходимым для корректного определения фокальных свойств адаптивных оптических элементов [11]. Бесконтактная диагностика поверхности жидкостей позволяет практически мгновенно получать информацию о множестве параметров жидкости, таких как вязкость [1], температуропроводность [5], коэффициент преломления [8], а также следить за динамикой поверхностных волн. Последнее, в свою очередь, дает возможность качественно анализировать стационарные и переходные процессы массопереноса в слое жидкости [3].

В настоящей работе с помощью метода фототермокапиллярного (ФТК) отклика [7] была исследована система, состоящая из двух тонких слоев несмешивающихся жидкостей, расположенных на твердой горизонтальной подложке (рис. 1), при нагреве их межфазной границы пучком лазера. Обнаружен и описан новый вид затухающей колебательной неустойчивости свободной и межфазной границ при непрерывном тепловом воздействии пучком лазера. Дана классификация режимов термокапиллярной конвекции, имеющих место в исследуемой системе, и определены критерии их возникновения.

Методика эксперимента

На рис. 1 представлена двухслойная система (L_1 — нижний слой, L_2 — верхний слой), находящаяся в чашке Петри диаметром 60 мм. Толщина L_1 составляла 2 мм, а толщина L_2 варьировалась в диапазоне от 0,3 до 1 мм. Жидкость L_1 была окрашена бриллиантовым зеленым для обеспечения поглощения излучения He-Ne лазера (17 мВт, 632,8 нм), а L_2 оставалась прозрачной. При поглощении излучения слоем L_1 температура на межфазной границе L_1 — L_2 возрастает, и после некоторой задержки $\tau_d = h_{L_2}^2 / 4\kappa_{L_2}$, происходящей вследствие диффузии тепла через слой L_2 , температура на свободной поверхности L_2

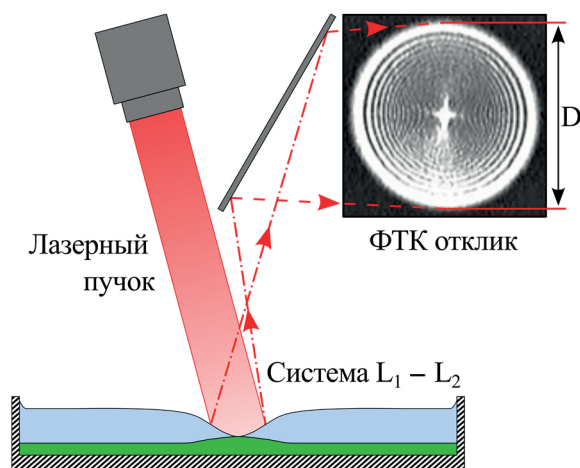


Рис. 1. Общая схема эксперимента

Fig. 1. Scheme of the experiment

локально увеличивается. Здесь h_{L_2} и κ_{L_2} являются толщиной и температуропроводностью слоя L_2 соответственно. Локальный нагрев способствует возникновению градиента поверхностного и межфазного натяжений вдоль границ L_2 и $L_1 - L_2$, приводящих к ТК деформации этих границ. Лазерный пучок, частично отраженный от деформированной поверхности жидкости, интерферируя, образует на удаленном экране систему концентрических колец, называемую фототермокапиллярным откликом (рис. 1). Диаметр (D) ФТК отклика меняется в зависимости от размера (максимального угла наклона поверхности) ТК углубления. В дальнейшем эволюцию диаметра ФТК отклика с течением времени измеряли для получения количественной информации о процессах в изучаемых системах. В исследованиях были использованы комбинации жидкостей, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Комбинации жидкостей

Table 1

Combination of liquids

L_1 (20 °C)	Межфазное натяжение $\gamma_{1,2}$	L_2 (20 °C)
Глицерин (60 мН/м, 1 300 сСт)	23,3 мН/м	Полиметилсилоксан (ПМС) 20 сСт
Этиленгликоль (48 мН/м, 20 сСт)	15,2 мН/м	ПМС 20 сСт
Бензиловый спирт (37 мН/м, 5,8 сСт)	~5 мН/м	ПМС 5 сСт, 19 мН/м ПМС 10 сСт, 19,6 мН/м ПМС 20 сСт, 20 мН/м

Поверхностное и межфазное натяжения выбранных комбинаций жидкостей измеряли методом пластины Вильгельми с помощью тензиометра DCA15 (DataPhysics, Германия) и методом висящей капли с помощью гониометра OCA 25 (DataPhysics, Германия) при $T = 20$ °C.

Результаты и обсуждение

В ходе экспериментов были установлены три режима протекания ТК конвекции в системе типа $L_1 - L_2$:

- I. Состояние устойчивого *термокапиллярного псевдоразрыва* слоя L_2 . При непрерывном облучении межфазной границы пучком лазера происходит вырождение увеличивающейся в диаметре интерференционной картины (ФТК отклика) в рассеянное световое пятно, что соответствует отражению лазерного луча либо от плоского слоя, либо от искривленного, с большим радиусом кривизны ($R_{кр.}$) деформации (рис. 2а). Понятие псевдоразрыва [13] введено по той причине, что ПМС полностью смачивает все три жидкости, и, как результат, на поверхности L_1 всегда присутствует тонкая смачивающая пленка.

- II. Состояние устойчивой *термокапиллярной деформации* — диаметр ФТК отклика увеличивается в процессе непрерывного нагрева межфазной границы до достижения некоторого постоянного значения D_{const} (рис. 2b), соответствующего стационарному профилю деформации свободной поверхности.
- III. Переходный режим — *затухающие колебания* диаметра ФТК отклика (рис. 2c). В этом случае ТК псевдоразрыв слоя L_2 и его последующее восстановление повторяются периодически с постепенно затухающей амплитудой до тех пор, пока слой L_2 не станет плоским либо обладающим достаточно малым стационарным углублением (если сравнивать величину D между временами $t = 0$ и $t = 270$ с, рис. 2c).

Обнаружено, что для пар жидкостей «глицерин — ПМС» и «этиленгликоль — ПМС» имеет место существование только первого (I) или второго (II) режимов в зависимости от толщины L_2 . Такое поведение подобно тому, которое происходит в случае лазерно-индуцированной ТК конвекции в однослойной системе на твердой подложке. Это сходство позволяет заключить, что L_1 может выступать в качестве жесткого основания. Однако в случае пары «глицерин — ПМС» в области пятна лазерного пучка была обнаружена выпуклая деформация L_1 (рис. 3), что говорит о наличии вихревых течений в L_1 .

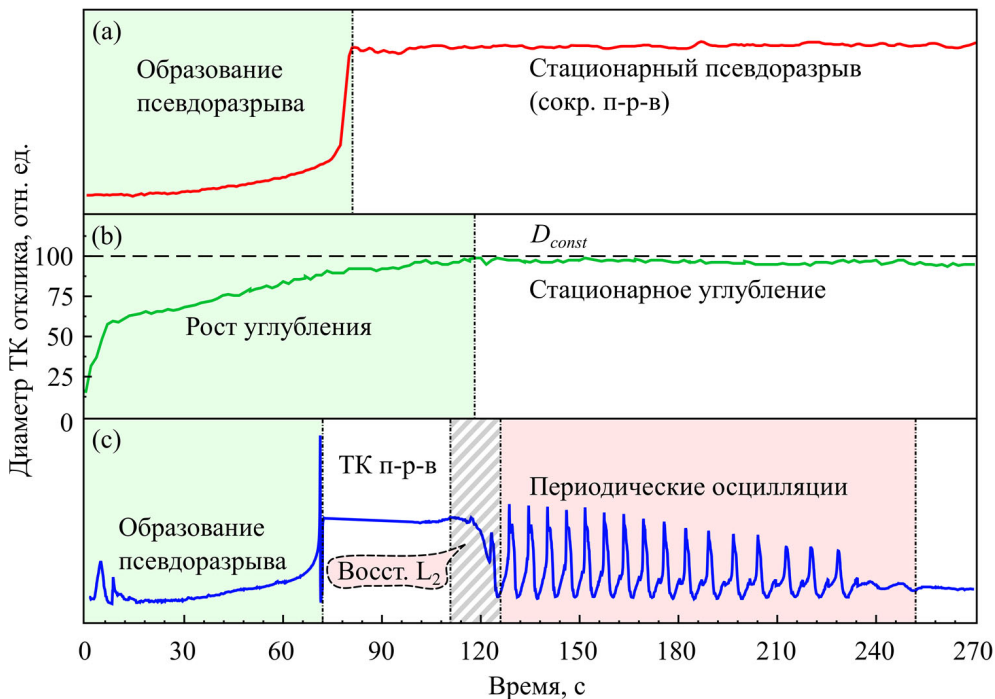


Рис. 2. Зависимость диаметра ФТК отклика от времени: режим ТК псевдоразрыва (a), режим ТК углубления (b), режим затухающих колебаний (c)

Fig. 2. The diameter of the PTC signal vs. time: the thermocapillary pseudo-rupture mode (a), the steady-state depression mode (b), the decaying oscillations mode (c)

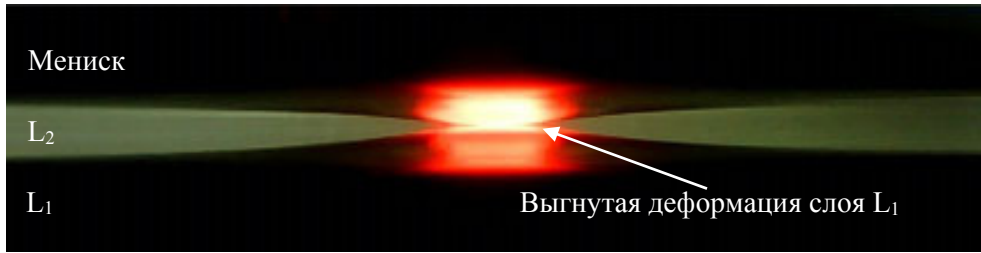


Рис. 3. Профиль ТК псевдоразрыва в системе «глицерин — ПМС»

Fig. 3. A side-view image of the TC pseudo-rupture in the “glycerol — PDMS” system

В системе бензиловый «спирт — ПМС» наблюдалось наличие всех трех режимов ТК неустойчивости в зависимости от отношения толщин $\varepsilon = h_{L_2}/h_{L_1}$: (I) ТК псевдоразрыв L_2 наблюдается при $\varepsilon < 0,2$; (II) стационарное ТК углубление слоя L_2 имеет место при $\varepsilon > 0,4$, а режим (III) затухающих колебаний диаметра ФТК отклика возникает при значениях ε , находящихся в диапазоне от 0,2 до 0,4.

Установлено, что уменьшение толщины L_2 ведет к увеличению общего времени колебаний (t_{osc}) и к уменьшению амплитуды ФТК отклика и периода осцилляций. Например, при изменении ε с 0,2 до 0,4 значение t_{osc} возрастает с 200 до примерно 400 с, а период колебаний уменьшается с 7 до 3 с. Между тем вязкость слоя L_2 влияет только на время образования псевдоразрыва.

С помощью ИК камеры выявлено, что в центре падения лазерного пучка в момент ТК псевдоразрыва происходит всплеск температуры с 35 °С до примерно 50 °С продолжительностью вплоть до начала затекания слоя L_2 (рис. 4). После полного затухания колебаний поверхность слоя L_2 приходит в состояние равновесия, а температура на поверхности слоя L_2 стабилизируется. Прекращение лазерной накачки приводит к выравниванию температуры вдоль межфазной границы и исчезновению деформации поверхности L_2 , соответственно, $D \rightarrow D(t = 0)$.

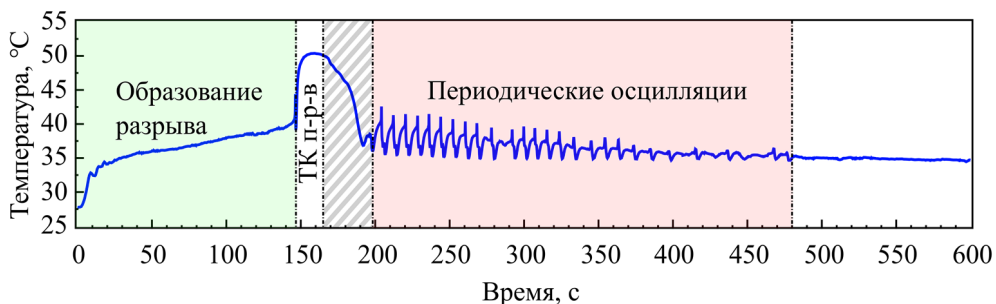


Рис. 4. Динамика температуры в центре падения лазерного пучка

Fig. 4. Temperature evolution in the center of laser beam incidence

Было замечено, что после полного затухания колебаний ($D \rightarrow const$), в центре плоскости слоя L_2 образуется пятно молочного оттенка (рис. 5а), площадь которого увеличивается с течением времени. Исследование с помощью микроскопа позволило установить, что данное пятно является скоплением микропузырей, характерный размер которых составляет 30–40 мкм (рис. 5б).

Переход системы в состояние колебательной неустойчивости предположительно происходит вследствие появления микропузырьков газа в слое L_2 , которые после формирования ТК псевдоразрыва (рис. 6а, нижний) накапливаются в зоне *стагнации* — в области вблизи границы псевдоразрыва (рис. 6б), где магнитуда скорости ТК течения наименьшая. В результате коалесценции микропузырьков формируются крупные газовые скопления, которые «срывают» линию псевдоразрыва (рис. 6а, верхний; рис. 6с), приводя к затеканию ТК углубления в слое L_2 .

Более наглядно этот процесс можно описать следующим образом. Известно, что большинство чистых жидкостей, находящихся в комнатных условиях, содержат в себе растворенный газ. При повышении температуры в системе зарождение газовых пузырьков будет происходить на межфазной границе $L_1 - L_2$ (в зоне раздела двух жидкостей) вследствие большего значения суммы давлений насыщенных паров жидкостей, чем их собственные показатели [16].

Из-за малой вязкости слоя L_1 и того, что средний объем присутствующих в слое газовых пузырьков примерно на 20 порядков больше минимального значения, необходимого для преодоления ими межфазной границы системы [10], большая часть микропузырей будет находиться в слое L_2 вблизи границы $L_1 - L_2$ и увлекаться придонными течениями L_2 , направленными в зону псевдоразрыва (рис. 6д, пунктирный отрезок DC). Часть микропузырьков, оставшаяся на межфазной границе, также будет увлекаться к границе псевдоразрыва, но уже за счет *капиллярного дрейфа* [2]. Коалесценция пузырьков в области стагнации приводит к образованию крупных газовых глобул, сидящих на межфазной границе $L_1 - L_2$ (рис. 6д, отрезок CB). Так как эти глобулы находятся вблизи области максимального нагрева, растущий градиент поверхностного натяжения

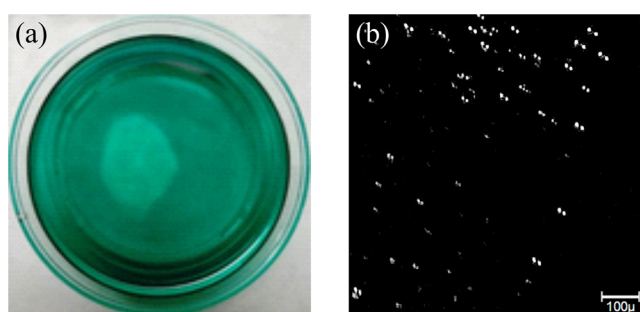


Рис. 5. Фотография «молочного» скопления в слое L_2 (вид сверху) (а), снимок микропузырей (б)

Fig. 5. The photo of the “fuzzy” formation in the L_2 layer (top view) (а), an image of microbubbles (b)

между точками границы пузырька В и С (рис. 6d) способствует продвижению глобул в область максимальной температуры (рис. 6d, зона ТК псевдоразрыва, точка А). При этом, т. к. пузыри сидят на границе $L_1 - L_2$, они образуют со слоями L_1 и L_2 (рис. 6d, черно-белый пунктир снизу и сплошная линия сверху между В и С соответственно) границу раздела «жидкость — газ», т. е. две поверхности со значительно повышенным, по сравнению с $\gamma_{1,2}$, поверхностным натяжением γ (таблица 1).

Таким образом, после образования ТК псевдоразрыва запускаются несколько одновременных процессов:

- 1) ТК конвекция жидкости в слое L_2 ;
- 2) ТК конвекция в слое L_1 под областью ТК псевдоразрыва;
- 3) гравитационное и капиллярное, вследствие кривизны поверхности, затекание слоя L_1 ;
- 4) капиллярный дрейф микропузырей в зону стагнации с периферии вдоль границы $L_1 - L_2$, приводящий к образованию области с высоким поверхностным натяжением.

Первые три процесса приводят к стационаризации ТК псевдоразрыва в своих конечных размерах, как, например, в работе [4]. Последний, наоборот, способствует дестабилизации границы псевдоразрыва (рис. 6а, сверху; рис. 6d), т. е. постепенному расклиниванию пленки ПМС из-за «наползающей» газовой

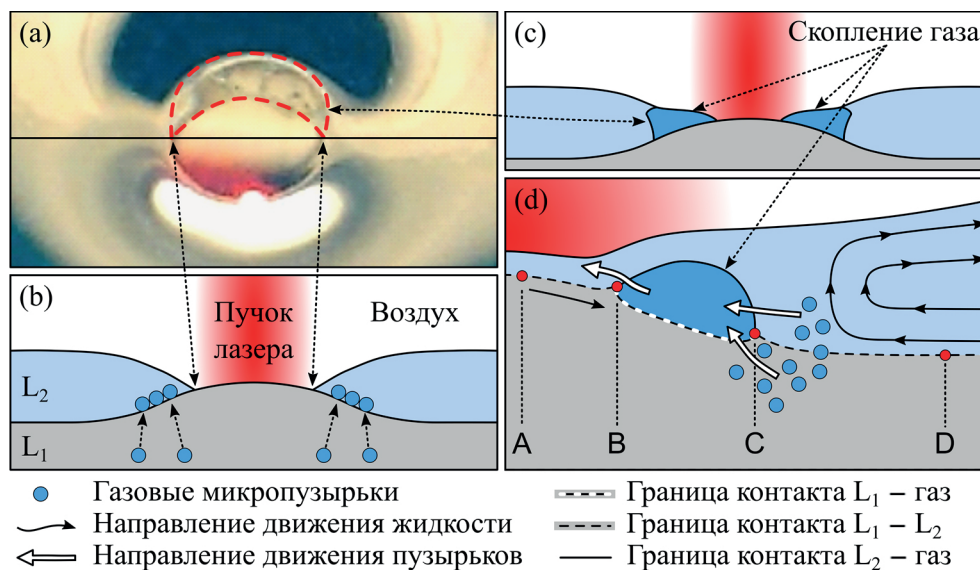


Рис. 6. Фотография ТК псевдоразрыва (а): процесс затекания слоя (сверху), стационарный псевдоразрыв (снизу); схема перехода системы из режима (I) в (III) (b-d)

Fig. 6. The photo of the TC pseudo-rupture (a): the layer filling process (top), the stationary pseudo-rupture (bottom); the scheme of the system transition from mode (I) to (III) (b-d)

глобулы в область максимума температуры. Как следствие, происходит отрыв пленки смачивания в зоне ТК псевдоразрыва и образование ТК углубления, но, в отличие от режима (II), с имеющейся под деформированной поверхностью верхнего слоя газовой прослойкой. Последнее состояние, как мы предполагаем, и является неким «спусковым механизмом» для перехода системы в режим колебательной неустойчивости. Газовая прослойка и дрейфующие к зоне нагрева микропузырьки рассеивают излучение лазерного пучка, уменьшая поглощение его нижним слоем, что ведет к ослабеванию ТК потоков в жидкости и переходу системы в режим (II). После отключения лазера накачки можно видеть, что пятно молочного оттенка имеет два максимума интенсивности: на оси падения пучка и на границе скопления — в зоне, где примерно располагалась область стагнации (рис. 5а).

Заключение

Методом ФТК отклика исследована ТК конвекция в двухслойных системах с открытой границей верхнего слоя в зависимости от его толщины. Установлено существование трех режимов ТК конвекции в этих системах:

- I. Состояние устойчивого *термокапиллярного псевдоразрыва* слоя L_2 ;
- II. Состояние устойчивой *термокапиллярной деформации* слоя L_2 ;
- III. Переходный режим — *затухающие колебания* диаметра ФТК отклика.

Предполагается, что переходный режим (III) вызван образованием зон повышенного межфазного натяжения за счет коалесценции микропузырьков, дрейфующих к центру нагрева, и увеличения площади контакта газовой и жидкой сред на границе раздела L_1 — L_2 , приводящей к исчезновению границы псевдоразрыва. Рост числа микропузырей в области воздействия лазерного пучка на межфазную границу ведет к уменьшению доли поглощаемой нижним слоем энергии за счет рассеяния излучения и, как следствие, к затуханию ТК течений в системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесконтактный способ измерения вязкости: патент 2201587 РФ / Б. А. Безуглый, А. А. Федоренко. № 2001106544/28; заявл. 11.03.2001; опубл. 27.03.2003. Бюл. № 9.
2. Братухин Ю. К. Термокапиллярный дрейф капельки вязкой жидкости / Ю. К. Братухин // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1975. № 5. С. 156-161.
3. Мизёв А. И. Экспериментальное исследование термокапиллярной конвекции, индуцированной локальной температурной неоднородностью вблизи поверхности жидкости. 1. Твердотельный источник тепла / А. И. Мизёв // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Том 45. № 4. С. 36-49.
4. Bekezhanova V. B. Thermocapillary deformations of a two-layer system of liquids under laser beam heating / V. B. Bekezhanova, V. M. Fliagin, O. N. Goncharova, N. A. Ivanova, D. S. Klyuev // International Journal of Multiphase Flow. 2020. Vol. 132. Pp. 103429. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103429

5. Bezuglyĭ B. A. Effect of delay of the thermocapillary response of a transparent liquid layer during laser heating of the absorbing substrate / B. A. Bezuglyĭ, S. I. Chemodanov // *Technical Physics*. 2005. Vol. 50. No. 9. Pp. 1243-1245. DOI: 10.1134/1.2051472
6. Chraïbi H. Thermocapillary flows and interface deformations produced by localized laser heating in confined environment / H. Chraïbi, J-P. Delville // *Physics of Fluids*. 2012. Vol. 24. Pp. 032102. DOI: 10.1063/1.3690160
7. Da Costa G. Self-holograms of laser-induced surface depressions in heavy hydrocarbons / G. Da Costa, J. Calatroni // *Applied Optics*. 1978. Vol. 17. No. 15. Pp. 2381-2385. DOI: 10.1364/AO.17.002381
8. Da Costa G. Time evolution of the caustics of a laser heated liquid film / G. Da Costa, R. Escalona // *Applied Optics*. 1990. Vol. 29. No. 7. Pp. 1023-1033. DOI: 10.1364/AO.29.001023
9. Doi T. Thermocapillary convection in two immiscible liquid layers with free surface / T. Doi, J. N. Koster // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. 1993. Vol. 5. Iss. 8. Pp. 1914-1927. DOI: 10.1063/1.858817
10. Edrisi A. A novel experimental procedure to measure interfacial tension based on dynamic behavior of rising bubble through interface of two immiscible liquids / A. Edrisi, M. Dadvar, B. Dabir // *Chemical Engineering Science*. 2021. Vol. 231. Pp. 116255. DOI: 10.1016/j.ces.2020.116255
11. Ivanova N. Biomimetic optics: liquid-based optical elements imitating the eye functionality / N. Ivanova // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2020. Vol. 378. Iss. 2167. Pp. 20190442. DOI: 10.1098/rsta.2019.0442
12. Juel A. Surface tension-driven convection patterns in two liquid layers / A. Juel, J. M. Burgess, W. D. McCormick, J. B. Swift, H. L. Swinney // *Physica D*. 2000. Vol. 143. Pp. 169-186.
13. Klyuev D. S. Thermocapillary deformation induced by a laser heating of thin liquid layers: Physical and numerical experiments / D. S. Klyuev, V. M. Fliagin, S. V. Semenov, N. A. Ivanova // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 172. Pp. 121020. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121020
14. Loulergue J. C. Interface deflections induced by the Marangoni effect: an application to infrared visible image conversion / J. C. Loulergue, P. Manneville, Y. Pomeau // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1981. Vol. 14. Pp. 1967-1977.
15. Nepomnyashchy A. *Interfacial Convection in Multilayer Systems* / A. Nepomnyashchy, I. Simanovskii. J. C. Legros: Springer Science, 2012. 513 p.
16. Randall M. The boiling point composition diagram of immiscible and partially miscible liquid systems / M. Randall, W. Avila // *Journal of Chemical Education*. 1940. Vol. 17. Iss. 11. Pp. 536-537.

Denis S. KLYUEV¹
Natalia A. IVANOVA²

UDC 532.23

**ON OSCILLATORY INSTABILITY
IN A SYSTEM OF TWO IMMISCIBLE LIQUIDS
UPON LOCAL HEATING OF THE INTERFACE**

¹ Junior Researcher,
Photonics and Microfluidics Research Laboratory,
X-BIO Institute, University of Tyumen
d.s.klyuev@utmn.ru; ORCID: 0000-0001-7018-2290

² Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,
Professor of the Department of Applied and Technical Physics,
Institute of Physics and Technology;
Head of Photonics and Microfluidics Research Laboratory,
X-BIO Institute, University of Tyumen
n.ivanova@utmn.ru; ORCID: 0000-0002-4121-8765

Abstract

Modern methods of controlling the shape of interfacial surfaces of miscible and immiscible liquids, as well as technologies based on them, adaptive liquid optics, or the so-called free-form optics, require a deep understanding of the processes of heat and mass transfer occurring at the interface. These processes have a significant effect on the shape of the surface and the rate of its transition to a stable state, which is the determining criterion for accommodating the optical characteristics of liquid-layer optics. The aim of this work is to study the main modes of thermocapillary convection in a horizontal system of two immiscible liquids. The reason for the occurrence of heat and mass transfer in the system under study was the local heating of the interface with the help of laser radiation. The technique for obtaining information about the change in the curvature of the layer surface as an indicator of the hydrodynamic stability of the system is based on measuring the diameter of the interference pattern formed on a remote

Citation: Klyuev D. S., Ivanova N. A. 2021. "On oscillatory instability in a system of two immiscible liquids upon local heating of the interface". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, no. 4 (28), pp. 111-123.
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-111-123

screen by a laser beam reflected from the deformed surface of the liquid. Using this method, it was found that one of the systems under consideration (benzyl alcohol — polymethylsiloxane) is characterized by the appearance of hydrodynamic instability of an oscillatory nature, which manifests itself in a change in the shape of both the interface between the two liquids and the free boundary. The distinctive features of the evolution of the detected instability are shown, and an assumption is made about the influence of microbubble clusters, revealed by the method of optical microscopy, as the cause of the onset and damping of oscillations. It is assumed that the movement of bubble clusters by means of thermocapillary flows and capillary drift contributes to the formation of a local difference in interfacial tension, leading to destabilization of the stable deformation of the layer and the transition of the system to a mode of oscillatory instability. The decay times and periods of oscillations are determined depending on the thickness of the upper layer.

Keywords

Thermocapillary flows, convection, two-layer system, laser heating, gas bubbles, interface, deformation of the liquid surface.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-4-111-123

REFERENCES

1. Bezuglyĭ B. A., Fedorets A. A. 2003. Non-contact viscosity measurement method. No. 2001106544/28; declared 11 March 2001; published on 27 March 2003. Bulletin no. 9. [In Russian]
2. Bratukhin Y. K. 1975. "Thermocapillary drift of a viscous liquid droplet". Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Mechanics of liquid and gas, no. 5, pp. 156-161. [In Russian]
3. Mizev A. I. 2004. "Experimental investigation of thermocapillary convection induced by a local temperature inhomogeneity near the liquid surface. 1. Solid source of heat". Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, vol. 45, no. 4, pp. 36-49. [In Russian]
4. Bekezhanova V. B., Fliagin V. M., Goncharova O. N., Ivanova N. A., Klyuev D. S. 2020. "Thermocapillary deformations of a two-layer system of liquids under laser beam heating". International Journal of Multiphase Flow, vol. 132, pp. 103429. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103429
5. Bezuglyĭ B. A., Chemodanov S. I. 2005. "Effect of delay of the thermocapillary response of a transparent liquid layer during laser heating of the absorbing substrate". Technical Physics, vol. 50, no. 9, pp. 1243-1245. DOI: 10.1134/1.2051472
6. Chraïbi H., Delville J.-P. 2012. "Thermocapillary flows and interface deformations produced by localized laser heating in confined environment". Physics of Fluids, vol. 24, pp. 032102. DOI: 10.1063/1.3690160
7. Da Costa G., Calatroni J. 1978. "Self-holograms of laser-induced surface depressions in heavy hydrocarbons". Applied Optics, vol. 17, no. 15, pp. 2381-2385. DOI: 10.1364/AO.17.002381

8. Da Costa G., Escalona R. 1990. "Time evolution of the caustics of a laser heated liquid film". *Applied Optics*, vol. 29, no. 7, pp. 1023-1033. DOI: 10.1364/AO.29.001023
9. Doi T., Koster J. N. 1993. "Thermocapillary convection in two immiscible liquid layers with free surface". *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 5, issue 8, pp. 1914-1927. DOI: 10.1063/1.858817
10. Edrisi A., Dadvar M., Dabir B. 2021. "A novel experimental procedure to measure interfacial tension based on dynamic behavior of rising bubble through interface of two immiscible liquids". *Chemical Engineering Science*, vol. 231, pp. 116255. DOI: 10.1016/j.ces.2020.116255
11. Ivanova N. 2020. "Biomimetic optics: liquid-based optical elements imitating the eye functionality". *Philosophical Transactions of the Royal Society A.*, vol. 378, issue 2167, pp. 20190442. DOI: 10.1098/rsta.2019.0442
12. Juel A., Burgess J. M., McCormick W. D., Swift J. B., Swinney H. L. 2000. "Surface tension-driven convection patterns in two liquid layers". *Physica D.*, vol. 143, pp. 169-186.
13. Klyuev D. S., Fliagin V. M., Semenov S. V., Ivanova N. A. 2021. "Thermocapillary deformation induced by a laser heating of thin liquid layers: Physical and numerical experiments". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 172, pp. 121020. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121020
14. Loulergue J. C., Manneville P., Pomeau Y. 1981. "Interface deflections induced by the Marangoni effect: an application to infrared visible image conversion". *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 14, pp. 1967-1977.
15. Nepomnyashchy A., Simanovskii I. 2012. *Interfacial Convection in Multilayer Systems*. J.C. Legros: Springer Science. Pp. 513.
16. Randall M., Avila W. 1940. "The boiling point composition diagram of immiscible and partially miscible liquid systems". *Journal of Chemical Education*, vol. 17, issue 11, pp. 536-537.