

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ НА ДИНАМИКУ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА*

А.А. Алабужев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН; Пермский государственный национальный исследовательский университет*

А.О. Иванцов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН; Пермский государственный национальный исследовательский университет*

М.И. Кайсина, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

Н.Н. Картавых, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

М.А. Кашина, *Пермский государственный национальный исследовательский университет*

В.В. Коновалов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Проведено теоретическое исследование поведения межфазной поверхности раздела в неоднородных силовых полях: изучение влияния электрического поля и вибраций на (1) поведение капель (пузырьков) на подложке с учетом динамики контактной линии, (2) образование и отрыв газового пузырька и (3) устойчивость поверхности жидкость – пар при пленочном кипении. Изучалось влияние как однородного переменного электрического поля на колебания полусферической капли на подложке и цилиндрической капли (газового пузырька), так и неоднородного. Исходя из полных уравнений тепломассопереноса была рассмотрена линейная устойчивость основного состояния межфазной поверхности жидкость – пар подожлажденного пленочного кипения с учетом модуляции поля тяжести, вызванной вертикальными вибрациями нагревателя, и приложенного по нормали к поверхности электрического поля.

Ключевые слова: капля жидкости, газовый пузырек, линия контакта, электрическое поле, вынужденные колебания, собственные колебания, кипение, пленки.

Введение

Одной из важных проблем динамики поверхности раздела является растекание жидкости по твердой подложке. С практической точки зрения изучение процессов растекания крайне актуально для ряда технологических приложений в нефтедобывающей и перерабатывающей промышленности, химической технологии, хроматографии, фармакологии, микроэлектронике. Но нанесение жидкости на

твердую подложку часто приводит к образованию тонкой пленки с разрывами, которые негативно влияют на технологический процесс. С другой стороны, разрушение пленки или слоя происходит с образованием отдельных капель или пузырьков, которые слабо взаимодействуют друг с другом.

Большую роль в динамике такого рода систем играют смачивание и движение контактной линии, поэтому важно по-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Пермского края (грант № 14-01-96017).

нять, как происходит смачивание подложки, растекание жидкости и научиться управлять движением контактной линии. Наиболее часто, в силу его простоты, используется условие, примененное в [1], где изучается затухание стоячих волн между двумя вертикальными стенками. Указанное условие предполагает линейную связь между скоростью движения контактной линии и краевым углом (в случае прямого равновесного краевого угла) – граничное условие Хокинга. В проекте данное условие использовалось для описания динамики контактной линии цилиндрического газового пузырька.

Электросмачивание или использование электрических полей для улучшения свойств смачивания активно используется в некоторых приложениях. Однако для теоретического описания значения краевого угла используется условие Юнга–Липмана [2], которое плохо согласуется с экспериментальными данными не только количественно, но и качественно. Авторами проекта было предложено модифицированное условие Хокинга, использование которого показало удовлетворительное согласие с экспериментом.

Известно, что в условиях микрогравитации режим пленочного кипения возникает при существенно меньших значениях теплового потока в системе, чем в нормальных условиях [3]. Режим пленочного кипения является обычно нежелательным из-за низкой теплоотдачи в системе и, как следствие, возможного перегрева материала нагревателя. Важно, поэтому, найти эффективный механизм отвода пара от поверхности нагревателя, который заменил бы плавучесть, в том случае, когда ее самой недостаточно, то есть для случая микрогравитации. Что касается отрыва пузырей пара, то таким механизмом могло бы стать вибрационное воздействие. Другим перспективным механизмом управления поведением неоднородных гидродинамических систем в условиях микрогравитации является электрическое поле.

Основные результаты, полученные в ходе выполнения проекта

Исследовано поведение газового цилиндрического пузырька в вибрационном [4–10] или электрическом поле [11]. Пузырек окружен несжимаемой жидкостью и ограничен в осевом направлении двумя параллельными твердыми поверхностями. Рассматривались случаи свободной и твердой внешней поверхности жидкости, однородное и неоднородное переменное электрическое поле. Скорость движения контактной линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла и скорости быстрых релаксационных процессов, частоты которых пропорциональны удвоенной частоте электрического поля.

Отдельно был рассмотрен случай четных мод вынужденных колебаний капли, зажатой между параллельными твердыми поверхностями. Было обнаружено, что такая капля неустойчива в симметричном линейно-неоднородном постоянном поле, тогда как в однородном поле она устойчива. Причина этой неустойчивости окончательно не выяснена. Обнаружено, что в переменном поле капля совершает трансляционные колебания при сколь угодно больших волновых числах. Отметим, что для аналогичного несимметричного поля существует трансляционное движение капли при малых волновых числах. С увеличением же волнового числа начинают возбуждаться моды с большим азимутальным числом, а движения капли, как целого, не происходит. Показано, что с увеличением частоты амплитуда колебаний уменьшается даже в резонансных случаях. Максимальная амплитуда наблюдается на основной частоте трансляционного движения. Однако, как было показано ранее, основная частота трансляционной моды собственных колебаний обращается в нуль начиная с некоторого значения параметра Хокинга. Поэтому с увеличением параметра Хокинга трансляционное движение прекращается и капля совершает малоамплитудные азимутальные колебания.

Изучено поведение полусферической капли на подложке под действием пере-

менного электрического поля [12, 13]. Скорость движения контактной линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла и скорости быстрых релаксационных процессов, частоты которых пропорциональны удвоенной частоте электрического поля.

Исходя из уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости и уравнения переноса тепла рассмотрена устойчивость пленки пара, образующейся на поверхности плоского горизонтального нагревателя при подохлажденном пленочном кипении с учетом влияния модуляции поля силы тяжести, вызванной вертикальными вибрациями нагревателя конечной частоты, а также приложенного по нормали к поверхности нагревателя постоянного электрического поля [14]. Показано, что в случае толстой паровой пленки эффект фазового перехода слабо влияет на пороги возникновения параметрической неустойчивости в системе и становления ее как наиболее опасной. В то же время воздействие электрического поля способствует увеличению указанных порогов. Обнаружено, что влияние вибраций на стабилизацию непараметрической неустойчивости в системе возможен лишь в узкой области пространства параметров, где существуют длинноволновые затухающие возмущения, и заключается в понижении критического теплового потока стабилизации. Стабилизированная таким образом паровая пленка может быть разрушена в результате развития параметрической неустойчивости. В отличие от случая толстого слоя пара порог возникновения параметрической неустойчивости для тонких пленок заметно зависит от величины подохлаждения в системе. Кроме того, данный порог уменьшается с ростом напряженности электрического поля.

Исследован отрыв газового пузыря от твердой плоской подложки, происходящий по «динамическому сценарию», то есть в результате сильных колебаний формы поверхности пузыря, вызванных нормальными неакустическими гармоническими вибрациями подложки [15]. От-

рыв пузыря изучен для условий микрогравитации, и динамика поверхности пузыря обусловлена «игрой» сил инерции жидкости и сил поверхностного натяжения. В качестве дополнительного фактора учтено приложенное электрическое поле. Найдена зависимость интенсивности вибрационного воздействия, необходимого для отрыва пузыря, от параметров задачи. Получены оценки для объемов отрывающихся пузырей. Расчеты показали, что для случая вибраций конечной частоты роль фактора, определяющего отрыв пузыря от подложки, играет амплитуда вибрационного ускорения. Необходима для отрыва пузыря интенсивность вибраций тем меньше, чем выше напряженность приложенного электрического поля. Полученные результаты являются актуальными для управления процессами кипения в условиях микрогравитации.

Трансляционная мода собственных колебаний цилиндрического пузырька

Рассматривается трансляционная мода собственных колебаний газового пузырька, окруженного несжимаемой жидкостью. В равновесном состоянии пузырек имеет форму цилиндра и ограничен в осевом направлении двумя параллельными твердыми поверхностями. Окружающая жидкость ограничена свободной поверхностью. Скорость движения линии контакта пропорциональна отклонению краевого угла от его равновесного значения.

Действительная часть частоты Ω_0 обращается в нуль начиная с некоторого значения λ (рис. 1, *a*). Т.е. такие «изгибные» колебания существуют только для достаточно малого параметра смачивания и обусловлены сильным взаимодействием капли с подложкой. В случае фиксированного краевого угла пузырек свободно скользит по подложке и колебания, сопровождающиеся движением центра масс пузырька, невозможны. При более высоких значениях λ возвращающая сила, действующая на пузырек со стороны подложки, недостаточна для возникновения колебательного движения. В этом случае

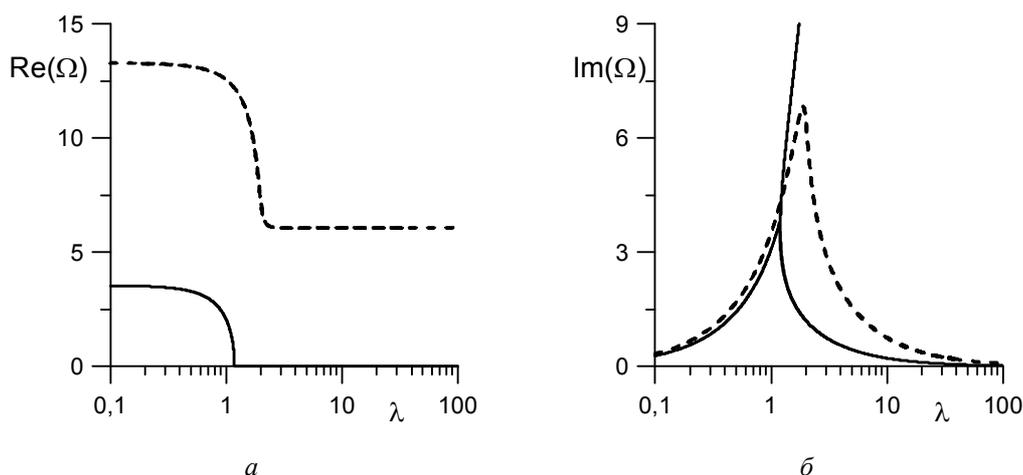


Рис. 1. Зависимость частоты $\text{Re}(\Omega)$ (а) и коэффициента затухания $\text{Im}(\Omega)$ (б) от λ ($R = 5$).

Ω_0 – сплошная линия, Ω_1 – штриховая

наблюдается затухающее поступательное движение пузырька по инерции (рис. 2, б). Это критическое значение λ растет с увеличением b . Подобное явление было обнаружено и для несжимаемых капель, окруженных жидкостью.

Влияние движения линии контакта на колебания пузырька в неоднородном электрическом поле

Исследовано поведение газового цилиндрического пузырька в неоднородном переменном электрическом поле. Пузырек окружен несжимаемой жидкостью и ограничен в осевом направлении двумя параллельными твердыми поверхностями. Скорость движения контактной ли-

нии пропорциональна сумме отклонения краевого угла и скорости быстрых релаксационных процессов, частоты которых пропорциональны удвоенной частоте электрического поля.

На рис. 2 показана форма боковой поверхности пузырька и линии контакта на верхней пластине в разные моменты времени в случае слабо неоднородного электрического поля. Удвоенная частота поля близка к частоте радиальных (объемных) колебаний пузырька. Из приведенных рисунков видно, что пузырек вытягивается вдоль неоднородного поля. Для несжимаемой капли в этом случае наблюдалось трансляционное движение.

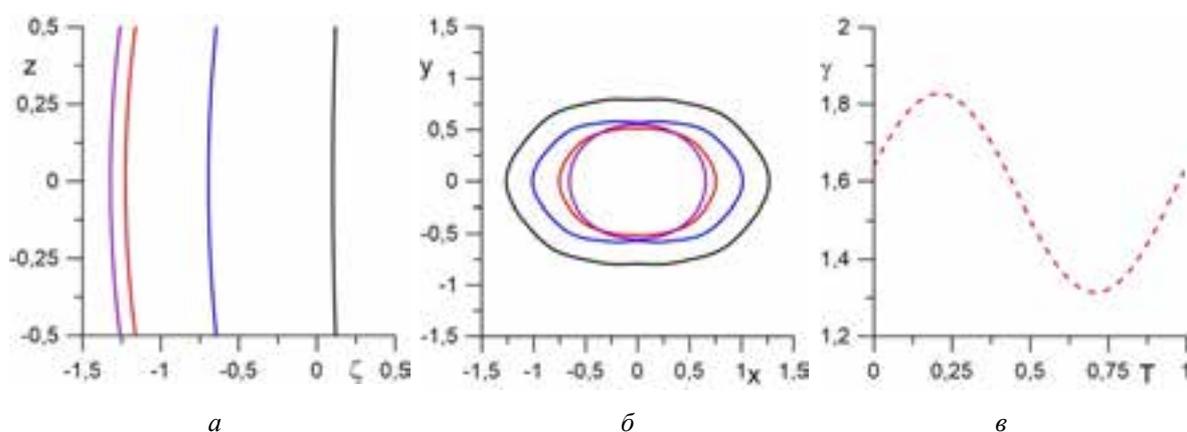


Рис. 2. Форма боковой поверхности пузырька, линии контакта и изменение краевого угла в разные моменты периода колебаний T ($t = 0$, $t = T/8$, $t = T/4$, $t = 3T/8$)

Библиографический список

1. *Hocking L.M.* The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary // *J. Fluid Mech.* – 1987. – Vol. 179. – P. 253–266.
2. *Mugele F., Baret J.-C.* Electrowetting: from basics to applications // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2005. – Vol. 17. – P. 705–774.
3. *Di Marco P., Grassi W.* About the scaling of critical heat flux with gravity acceleration in pool boiling // *Proc. XVII UIT National Heat Transfer Conference, Ferrara, June 30 – July 2, 1999.* – Vol. 1. – P. 139–150.
4. *Кайсина М.А.* Динамика цилиндрического пузырька в переменном поле давления // *Материалы XXIII Всерос. школы-конф. молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках».* – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. – С. 107–110.
5. *Алабужев А.А., Кайсина М.И.* Трансляционная мода собственных колебаний цилиндрического пузырька // *Вест. Перм. ун-та. Сер.: Физика.* – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 35–41.
6. *Алабужев А.А., Кайсина М.И.* Влияние движения линии контакта на осесимметричные колебания цилиндрического пузырька // *Вест. Перм. ун-та. Сер.: Физика.* – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 56–68.
7. *Кайсина М.И.* Азимутальные моды собственных колебаний цилиндрического пузырька // *Вест. Перм. ун-та. Сер.: Математика. Механика. Информатика.* – 2015. – Вып. 2 (29). – С. 37–45.
8. *Алабужев А.А., Кайсина М.И.* Собственные азимутальные колебания цилиндрического пузырька в сосуде конечного объема // *Вест. Перм. ун-та. Сер.: Физика.* – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 38–47.
9. *Alabuzhev A.A., Kaysina M.I.* The translational oscillations of a cylindrical bubble in a bounded volume of a liquid with free deformable interface // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2016. – Vol. 681. – 012043.
10. *Алабужев А.А., Кайсина М.И.* Динамика цилиндрического газового пузырька с учетом движения линии контакта // *Материалы XI Междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016), 25–31 мая 2016 г., Алушта.* – М.: Изд-во МАИ, 2016. – С. 57–59.
11. *Алабужев А.А., Кашина М.А.* Влияние движения линии контакта на колебания пузырька в неоднородном электрическом поле // *Тез. докл. VIII Всерос. конф. «Актуальные проблемы прикладной математики и механики», посв. памяти академика А.Ф.Сидорова, и Всерос. молодежной школы-конф. (Абрау-Дюрсо, 5–10 сентября 2016 г.).* – Абрау-Дюрсо: Изд-во ИММ УрО РАН, 2016. – С. 3–4.
12. *Алабужев А.А.* Влияние переменного электрического поля на поведение полусферической капли // *Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016), 25–31 мая 2016 г., Алушта.* — М.: Изд-во МАИ, 2016. – С. 56–57.
13. *Алабужев А.А.* Вынужденные колебания полусферической капли невязкой жидкости на подложке в переменном электрическом поле // *Материалы XXV Всерос. школы-конф. молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках».* – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. – С. 12–16.
14. *Коновалов В.В.* Устойчивость паровой пленки горизонтального подохлажденного пленочного кипения // *Материалы XXIII Всерос. школы-конф. молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках».* – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. – С. 129–132.
15. *Коновалов В.В.* Отрыв газового пузырька от вибрирующей подложки в поле электрических сил // *Тез. докл. VIII Всерос. конф. «Актуальные проблемы прикладной математики и механики», посв. памяти академика А.Ф.Сидорова, и Всерос. молодежной школы-конф. (Абрау-Дюрсо, 5–10 сентября 2016 г.).* – Абрау-Дюрсо: Изд-во ИММ УрО РАН, 2016. – С. 53.

INFLUENCE OF EXTERNAL FORCE FIELDS ON INTERFACE DYNAMICS

A.A. Alabuzhev^{1,2}, A.O. Ivantsov^{1,2}, N.N. Kartavih², M.A. Kashina²,
M.I. Kaysina², V.V. Konovalov¹

¹ *Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS*

² *Perm State National Research University*

The aim of this project is theoretical study of the behavior of the interface in non-uniform force fields: the study of the influence of an electric field and vibrations on (1) the behavior of drops (bubbles) on a substrate, taking into account the contact line dynamics, (2) the formation and separation of a gas bubble, and (3) the stability of a fluid-vapor surface in film boiling. The effect of a uniform, as well as a non-uniform alternating electric field on the oscillations of a hemispherical drop, located on the substrate and a cylindrical drop (gas bubble), was studied. Linear stability of the

ground state of the interface: fluid – vapor of sub-cooled film boiling was considered based on overall heat and mass transfer equations. The interface was under a modulated gravity field caused by vertical vibrations of the heater, and the electric field which was applied along the normal to the surface.

Keywords: drop, gas bubble, contact line, electric field, forced oscillations, eigen oscillations, boiling, fluid film.

Сведения об авторах

Алабужев Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории вычислительной гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; доцент кафедры теоретической физики физического факультета, Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: alabuzhev@icmm.ru

Иванцов Андрей Олегович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории вычислительной гидродинамики, ИМСС УрО РАН; старший преподаватель кафедры теоретической физики физического факультета, ПГНИУ; e-mail: aivantsov@icmm.ru

Кайсина Мария Игоревна, магистр физического факультета, ПГНИУ; e-mail: linkinpark335@gmail.com

Картавых Наталья Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики фазовых переходов физического факультета, ПГНИУ; e-mail: kartavykh@psu.ru

Кашина Марина Анатольевна, магистр физического факультета, ПГНИУ; e-mail: ya.kashina-marina@yandex.ru

Коновалов Владимир Владиславович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории вычислительной гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: konov2@psu.ru

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.