

03

Экспериментальное исследование особенностей эволюции уединенных трехмерных волн на поверхности нагреваемой пленки жидкости

© С.В. Алексеенко, В.В. Гузанов, Д.М. Маркович, С.М. Харламов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет
E-mail: guzanov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 2 августа 2013 г.

Представлены результаты экспериментального исследования особенностей эволюции уединенной трехмерной волны на поверхности пленки жидкости, свободно стекающей по вертикальной нагреваемой поверхности в условиях постоянства теплового потока. Установлено небольшое влияние волны на температуру поверхности пленки. Показано, что при взаимодействии трехмерной волны с термокапиллярными структурами на поверхности пленки происходит втягивание волны в центр струи.

При неизотермическом течении пленок жидкости по плоским поверхностям выделяют два режима: термокапиллярный и термокапиллярно-волновой [1]. Первый режим реализуется в узком диапазоне режимных параметров, в котором влияние гидродинамических волн на формирующиеся за счет термокапиллярных сил структуры не существенно. Тогда как второй режим существует в более широком диапазоне параметров, и на поверхности пленки одновременно наблюдаются как гидродинамические волны, так и термокапиллярные структуры. Поскольку возникающие на поверхности пленки волны и структуры имеют трехмерную форму для адекватного теоретического описания таких режимов течения, необходимо рассматривать трехмерные модельные уравнения. Среди таких моделей наиболее перспективной представляется модель в работе [2]. Результаты численного моделирования качественно и количественно согласуются с результатами экспериментальных наблюдений. Так, например, показано появление регулярных статических продольных структур — струй

и межструйных областей, с которыми взаимодействуют трехмерные волны, на поверхности пленки. С течением времени данные структуры трансформируются в волновые ривулеты, разделенные тонким слоем жидкости. Вместе с тем в работах по неизотермическому пленочному течению основное внимание уделяется исследованию характеристик струй. Вопросы о характеристиках трехмерных волн на поверхности неизотермических пленок затрагиваются в небольшом количестве экспериментальных работ [3,4]. Основным недостатком этих работ является исследование естественных трехмерных волн, характеристики которых, как известно, могут существенно отличаться в одной и той же части течения и априори неизвестны. Следует отметить, что в работе [3] на пленке возбуждались двумерные волны, которые имеют хорошо воспроизводимые характеристики. Однако область измерений с нагревателем располагалась на большом расстоянии от начала течения и на подходе к измерительной области, двумерная волна вследствие поперечной неустойчивости распадалась на взаимодействующие между собой трехмерные волны, характеристики которых подвержены случайным флуктуациям.

По аналогии с методом возбуждения трехмерных волн, примененным в [5], в работе [6] для исследования трехмерных волн на наклонной нагреваемой пленке для возбуждения волновых структур на поверхности пленки использовался удар капли рабочей жидкости большого объема в области нагревателя. Однако возбуждаемая волновая структура активно взаимодействовала с уже сформировавшимися в области возбуждения трехмерными волнами, и ее характеристики были подвержены случайным флуктуациям. Таким образом, несмотря на активное изучение неизотермических течений пленок жидкости, трехмерные волны в таких течениях исследованы слабо, что связано, в первую очередь, со случайным характером образования и развития естественных трехмерных волн, чьи характеристики не могут быть предсказаны или воспроизведены с достаточной точностью. Однако уединенные трехмерные волны с контролируемыми характеристиками могут быть возбуждены ударом капли рабочей жидкости на безволновом участке течения пленки [5], что позволяет исследовать эволюцию одиночной волны без возмущающего влияния других волн.

Целями данной работы являются экспериментальное исследование особенностей эволюции возбуждаемой точечным источником уединенной трехмерной волны на поверхности пленки жидкости, стекающей по

нагревателю, изучение влияния нагрева на форму такой волны, а также исследование возмущений температурного поля поверхности пленки, вызываемых уединенной трехмерной волной.

Эксперименты проводились на вертикальной пластине с нагревателем, обеспечивающим условие постоянства теплового потока q . Пленка жидкости на поверхности пластины формировалась при помощи щелевого распределителя с фиксированной шириной щели. Равномерность орошения поверхности пластины контролировалась при помощи двумерных волн, возбуждаемых периодической модуляцией расхода жидкости. При равномерном орошении фронт двумерных волн является плоским. В качестве нагревательного элемента использовалась тонкая ($40\ \mu\text{m}$) фольга из нержавеющей стали, имеющая малый температурный коэффициент электрического сопротивления ($\alpha = 0.12 \cdot 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$) размером $18\ \text{cm}$ в поперечном и $15\ \text{cm}$ в продольном направлениях. Верхний край нагревателя располагался на расстоянии $5\ \text{cm}$ от выхода из пленкоформирователя. Задняя (нерабочая) поверхность пластины была теплоизолирована. Для обеспечения условия постоянства теплового потока q , при помощи припаянных по всей длине фольги с двух сторон медных шин через нагреватель пропускался постоянный ток от стабилизированного источника. Потенциометрические измерения в различных точках нагревателя показали, что неравномерность распределения плотности электрического тока, а значит и плотности тепловыделения вдоль его поверхности, не превышала 0.5% .

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, температура которой поддерживалась постоянной при подаче на рабочий участок и составляла 24°C . Уединенные трехмерные волны возбуждались ударом капли рабочей жидкости на расстоянии $2\ \text{cm}$ от выхода из пленкоформирователя. Энергия возбуждения трехмерных волн подбиралась таким образом, чтобы их характеристики были близки к характеристикам стационарных волн [6], считающихся основным структурным элементом для трехмерных волновых режимов пленочного течения [7].

В экспериментах осуществлялось одновременное измерение поля толщин нагреваемой пленки и поля температур на ее поверхности на площади $10 \times 10\ \text{cm}^2$ над поверхностью нагревателя. Поле толщин измерялось с использованием метода лазерно-индуцированной флуоресценции (метод ЛИФ). Суть метода заключается в том, что мгновенное поле толщин пленки вдоль поверхности пластины определяется по

интенсивности свечения флуоресцентного красителя, растворенного в рабочей жидкости. В качестве флуорофора использовался Родамин 6Ж, растворенный в рабочей жидкости в концентрации 15 mg/l. Для возбуждения флуоресценции использовался непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой с длиной волны излучения 532 nm и мощностью 2 W. Съемка производилась высокоскоростной камерой „ВидеоСпринт/G4“. Пространственное разрешение вдоль поверхности пластины составляло 0.13 mm/pix. Основная погрешность измерений толщины связана с характеристиками матрицы использованной камеры и составляла 5%. Погрешность, связанная с влиянием температуры воды на яркость свечения растворенного в ней флуорофора, определялась в дополнительных экспериментах, которые показали, что при используемой концентрации раствора в диапазоне температур от 20 до 90°C эта погрешность не превышает 1%.

Для регистрации поля температуры на поверхности пленки в области нагревателя использовался высокоскоростной ИК-сканер Titanium ATR-570M с чувствительностью 25 mK. Съемка осуществлялась с разрешением 0.47 mm/pix. Погрешность измерений температуры с учетом шумов не превышала 0.05 K. Синхронная регистрация ЛИФ изображений и термограмм поверхности пленки осуществлялась с частотой 100 Hz.

Эксперименты проводились в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения $Re \leq 11$ и плотностях теплового потока $q \leq 0.6 \text{ W/cm}^2$ ($Re = Q/\nu$, где Q — удельный объемный расход жидкости, ν — кинематическая вязкость). Исследование особенностей эволюции уединенной трехмерной волны при нагреве пленки проводилось для тех же Re и условий возбуждения, что и в отсутствие теплового потока. Установлено, что в указанном диапазоне режимных параметров на участке течения, где пленка остается гладкой, характеристики уединенных трехмерных волн совпадают с характеристиками волн в отсутствие теплового потока.

Влияние трехмерной волны на температуру поверхности жидкости сводится к небольшому, не превышающему нескольких десятых градуса, возмущению. Размеры области температурных возмущений совпадают с размерами волны (рис. 1). При этом отклонение температуры поверхности пленки ΔT от невозмущенного значения происходит примерно в противофазе с отклонением толщины пленки от невозмущенного значения толщины (рис. 2). В области переднего фронта волны и ее

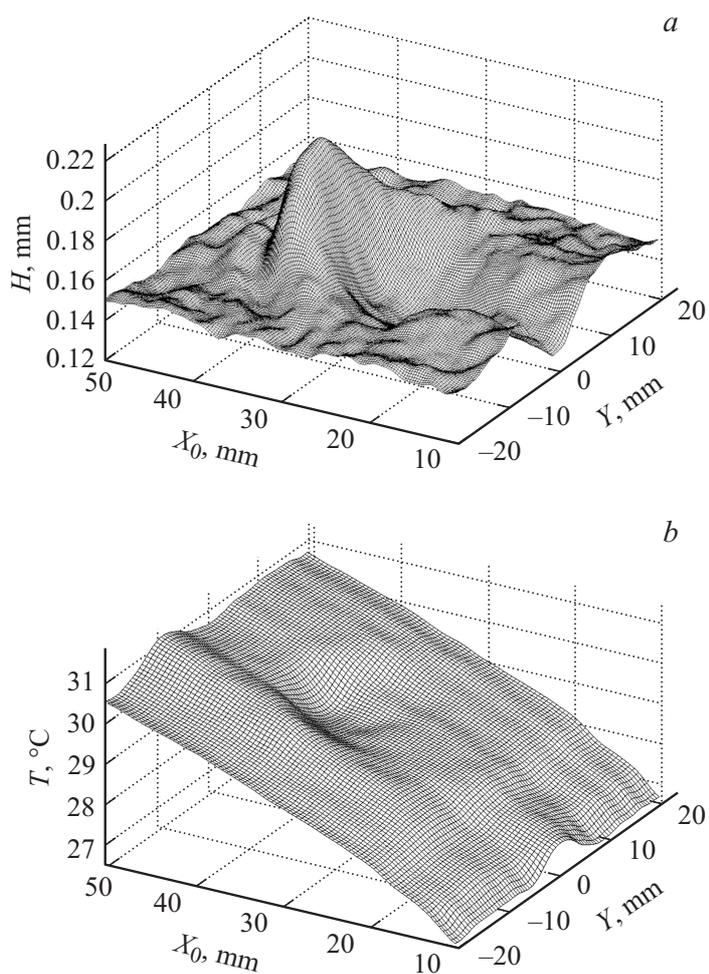


Рис. 1. Одновременные поля толщины (а) и температуры поверхности (b) пленки, стекающей по нагреваемой поверхности при прохождении трехмерной волны. $Re = 11$, $q = 0.4 \text{ W/cm}^2$. X_0 — расстояние от верхнего края нагревателя. Y — поперечная координата, привязанная к точке возбуждения.

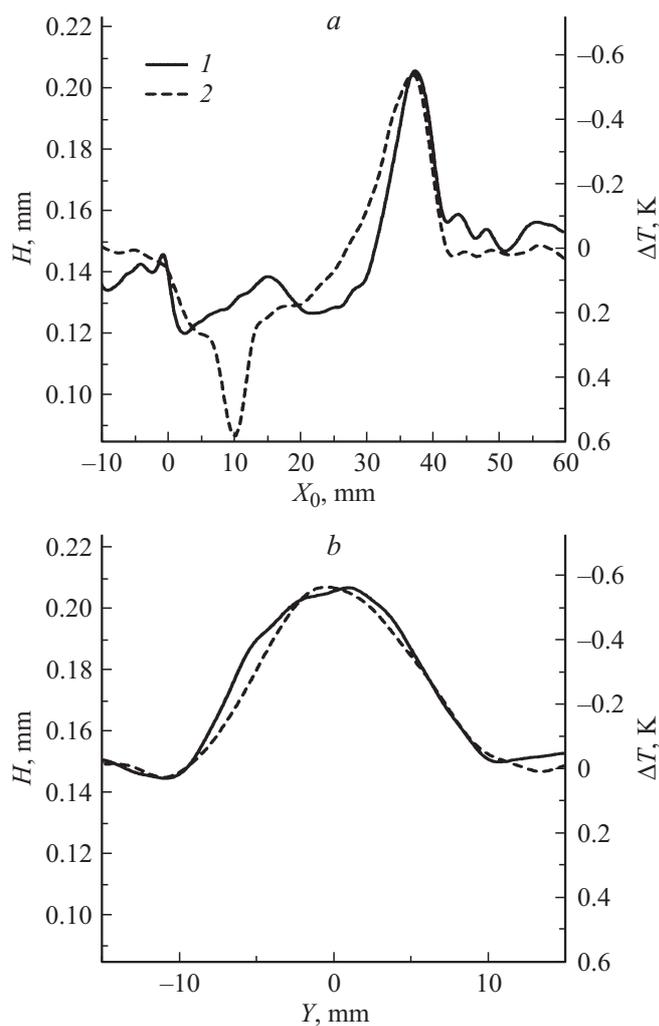


Рис. 2. Продольные (а) и поперечные (b) сечения волны с рис. 1, проведенные через ее максимум: 1 — толщина пленки, 2 — отклонение температуры поверхности пленки от невозмущенного значения. Для наглядности ось температуры инвертирована.

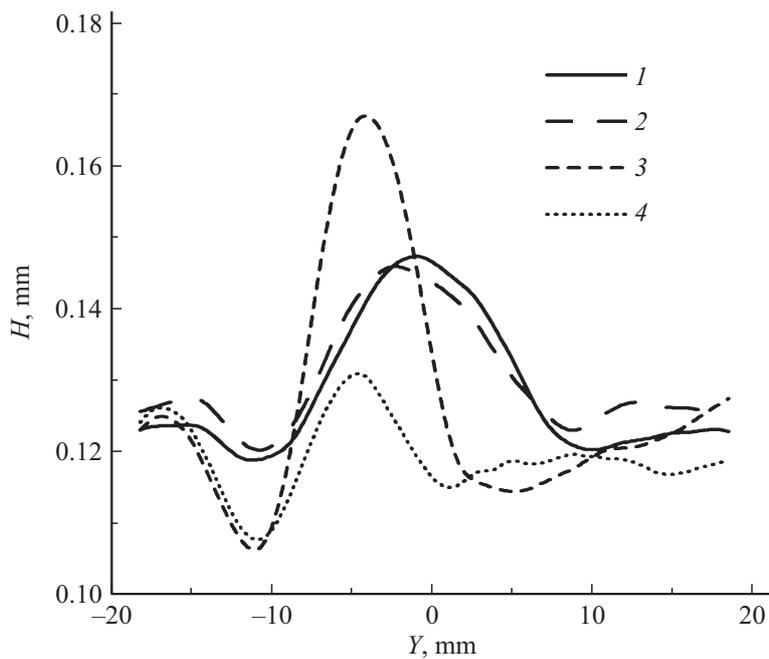


Рис. 3. Последовательные стадии взаимодействия уединенной трехмерной волны со струей. $Re = 7.4$, $q = 0.2 \text{ W/cm}^2$. Линии 1–3 — поперечные сечения, проведенные через максимум трехмерной волны в последовательные моменты времени, линия 4 — поперечное сечение пленки, не возмущенной прохождением трехмерной волны, для того же расстояния от распределителя, что и линия 3.

максимума изменение толщины и температуры происходит строго в противофазе, а значения отклонений толщины пленки и температуры поверхности от невозмущенных значений прямо пропорциональны (рис. 2).

Отличие эволюции уединенных волн в неизотермическом случае заключается только во взаимодействии волн со статическими продольными структурами — струями и межструйными областями, возникающими за счет термокапиллярных сил на поверхности пленки.

В общем случае взаимодействие уединенной волны со струями и межструйными областями происходит по следующему сценарию: трехмерная волна, имеющая исходно симметричную в поперечном

направлении форму (рис. 3, линия 1), начиная взаимодействовать со струей в области ее зарождения, где амплитуда струи составляет несколько микрон, теряет симметрию, и ее максимум начинает смещаться в сторону центра струи (рис. 3, линия 2). В конечном итоге максимум волны (рис. 3, линия 3) совмещается с максимумом струи, а ее поперечные размеры становятся близкими к поперечным размерам струи, т. е. происходит втягивание трехмерной волны в струю. При этом возмущение от трехмерной волны полностью захватывает только ту из межструйных областей, со стороны которой первоначально находилась трехмерная волна, тогда как с противоположной стороны струи это возмущение не проникает дальше центра межструйной области. Следует отметить, что поперечные размеры возбуждаемых трехмерных волн в условиях эксперимента в 1.5–2 раза превышали поперечные размеры образующихся струй (10–15 mm), т. е. одновременно с втягиванием происходило сжатие трехмерных волн в поперечном направлении.

Таким образом, эксперименты показали, что струйная структура, формирующаяся на поверхности нагреваемой пленки жидкости, устойчива к взаимодействию с уединенными трехмерными волнами, а само взаимодействие сводится к втягиванию уединенных волн в струи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-01-00778) и гранта правительства Российской Федерации в рамках программы поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах, грант № 11.G34.31.0035.

Список литературы

- [1] *Kabov O.A., Chinnov E.A.* // Russ. J. Eng. Thermophys. 1997. V. 7. N 1–2. P. 1–34.
- [2] *Kalliadasis S., Ruyer-Quil C., Scheid B., Velarde M.G.* Falling Liquid Films. London: Springer, 2012. 440 p.
- [3] *Lel V.V., Kellermann A., Dietze G., Kneer R., Pavlenko A.N.* // Exp. Fluids. 2008. V. 44. P. 341–354.
- [4] *Чиннов Е.А., Абдуракипов С.С.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 5. С. 41–47. [*Chinnov E.A., Abdurakipov S.S.* // Technical Physics Letters. 2013. V. 39. N 3. P. 248–251.]

- [5] *Алексеевко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 22. С. 1–8. [*Alekseenko S.V., Guzanov V.V., Markovich D.M., Kharlatov S.M.* // Technical Physics Letters. 2010. V. 36. N 11. P. 1024–1027.]
- [6] *Чиннов Е.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 6. С. 22–29. [*Chinnov E.A.* // Technical Physics Letters. 2010. V. 36. N 3. P. 258–261.]
- [7] *Demekhin E.A., Kalaidin E.N., Kalliadasis S., Vlaskin S.Yu.* // Phys. Fluids. 2007. V. 19. 114 104 (15 p.).