

УДК 536.423.4

## **ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫМ МЕТОДОМ\***

**Е.А. ЧИННОВ, С.М. ХАРЛАМОВ, А.В. САПРЫКИНА, О.В. ЖУКОВСКАЯ**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

Для измерения мгновенного поля толщин стекающей неизотермической пленки воды использован флуоресцентный метод. Зарегистрирован процесс формирования струй в нагреваемой пленке. Осреднение измерений позволило определить степень поперечной деформации пленки. В нижней половине нагревателя в межструйной области неизотермической пленки амплитуда волн убывает с ростом плотности теплового потока и уменьшением средней толщины. Выделены две области влияния плотности теплового потока на деформацию пленки жидкости. При малых тепловых потоках течение пленки практически не деформировано. При высоких тепловых потоках термокапиллярные силы приводят к формированию струй и тонкой пленки между ними.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для изучения механизма теплообмена в стекающих пленках жидкости необходима новая информация о динамике деформированной поверхности.

В работе [1] в длинноволновом приближении исследовалась трехмерная неустойчивость стекающей изотермической пленки жидкости. Показано, что двумерные волны всегда неустойчивы. Теоретически предсказано существование трехмерных синхронных и субгармонических волн. Исследование течения пленки 31 % раствора глицерина в воде по наклонной поверхности, формирования и развития трехмерных волн содержится в работе [2]. Использовался флуоресцентный метод. Двумерные волны на поверхности пленки формировались искусственным образом за счет возмущений давления с определенной частотой в пленкоформирователе. Экспериментально зарегистрированы теоретически предсказанные в [1] трехмерные синхронные и субгармонические волны.

Детальное экспериментальное исследование волновых характеристик стекающей по изотермической поверхности пленки жидкости в области средних чисел Рейнольдса и высоких чисел Капицы выполнено в [3]. Использовался метод электропроводности, основанный на измерении электрической проводимости между двумя электродами, вделанными заподлицо с подложкой, по которой течет пленка жидкости. Толщина пленки жидкости измерялась в пяти точках с разной длиной пробега пленки от 80 до 360 мм. Измерены средние толщины, амплитуды, частоты и фазовые скорости волн.

Первое упоминание о формировании регулярных струй на поверхности нагреваемой пленки жидкости, по-видимому, содержится в работе [4], где исследовался

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (НШ-6749.2006.8), РФФИ (гранты № 05-08-33325-а, 06-01-00360-а), ФЦНТП (Гос. контракт № 02.438.11.7002), и СО РАН (Междисциплинарный интеграционный проект № 111).

теплообмен к пленке воды, стекающей по внешней стороне вертикальной трубы диаметром 31,5 мм, с обогреваемым участком длиной 0,2 м. При уменьшении расхода в пленке образовывались два или три вертикальных утолщения с тонкой пленкой жидкости между ними. При дальнейшем уменьшении расхода жидкости в тонкой пленке появлялись смываемые сухие пятна, которые затем становились устойчивыми и разделяли жидкость на отдельные струйки.

В работах [5, 6] впервые обнаружено формирование регулярных структур в виде трехмерных образований в гладкой пленке 25 % раствора спирта, стекающей по плоскости с нагревателями малого размера 6,5×13 мм. В экспериментах были достигнуты значительные градиенты температуры (до 15 К/мм) на поверхности пленки. При плотности теплового потока выше порогового значения на нагревателе формировался горизонтальный вал, что приводило к движению жидкости в виде вертикальных струй и тонкой пленки между ними.

Как показано в теоретической работе [7], в однородно нагретых гравитационно стекающих пленках жидкости при малых числах Рейнольдса термокапиллярные эффекты усиливают волновую неустойчивость. Их нелинейное взаимодействие приводит к разрушению двумерного волнового режима, возникновению волнистости поверхности в поперечном направлении и формированию струй.

В работе [8] обнаружено два механизма формирования струй в неизотермической стекающей пленке жидкости. Как показано в [9], термокапиллярно-волновой режим является следствием наложения двух механизмов термокапиллярной неустойчивости и гидродинамической трехмерной неустойчивости. Деформации на поверхности пленки появляются в результате развития гидродинамической неустойчивости на нагревателях достаточной ширины и длины при  $Re > 5$  в области формирования двумерных или трехмерных волн. Под действием термокапиллярных сил, направленных от более горячих областей к холодным, происходит рост деформации поверхности пленки. При течении пленки жидкости по протяженным нагревателям достаточной ширины струи развиваются в области трехмерной неустойчивости волн. Причем формирование струйного течения происходит постепенно с ростом теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя. Измерения волновых характеристик неизотермической пленки одиночными оптоволоконным [10] и емкостным [11] датчиками позволили получить только локализованные в пространстве данные. Информация о поле толщин в нагреваемой пленке жидкости практически отсутствует.

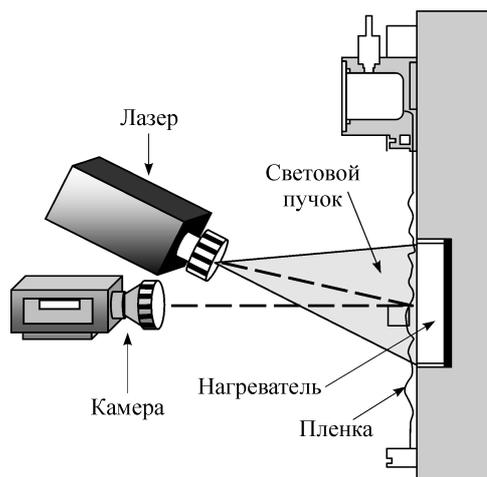
## 1. УСТАНОВКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включающий резервуар с насосом, рабочий участок, фильтр, ротаметры, трубопроводы и запорную арматуру. Подробное описание экспериментальной установки приведено в [12]. Экспериментальное исследование формирования струй в пленке воды проводилось на вертикальной пластине с нагревателем размером 150×150 мм. При течении пленок воды в области исследуемых значений  $Re$  на поверхности нагревателя реализовывалось условие постоянства плотности теплового потока  $q = \text{const}$ . Расстояние от распределительного устройства до верхнего края нагревателя  $X_n$  составляло 200 мм. Число Рейнольдса пленки равнялось 33 ( $Re = \Gamma/\mu$ , где  $\Gamma$  — удельный массовый расход жидкости,  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости жидкости). Толщина пленки, рассчитанная по зависимости Нуссельта, составляла  $h_{nus} = 0,203$  мм. Начальная температура жидкости равнялась  $T_0 = 24$  °С.

Для определения толщины и волновых характеристик пленки использован модифицированный флуоресцентный метод измерения толщины. На качественном уровне возможность использования флуоресцентного метода для диагностики

Рис. 1. Схема флуоресцентного метода.

неизотермических пленок была продемонстрирована в [13]. В отличие от традиционных схем [2, 14] источник и приемник излучения расположены с одной стороны от поверхности пленки (рис. 1). В качестве красителя применялся Родамин 6Ж, который не является сурфактантом и флуоресцентные свойства которого не зависят от температуры при низких концентрациях раствора. Аппаратный комплекс системы основан на базе стандартного PIV измерителя скорости



фирмы “Dantec”. Для возбуждения флуорофора используется сдвоенный импульсный NdYAG лазер, освещающий на пластине площадку размерами 120×120 мм. Переизлученный флуорофором свет регистрируется работающей в режиме двойного кадра цифровой PIV-камерой с красным светофильтром. В таком режиме рабочий цикл камеры состоит из регистрации двух изображений через заданный интервал времени, который может программно задаваться в диапазоне от 2 мкс до 56 мс. Время экспозиции каждого кадра равно длительности лазерного импульса (10 нс). Максимальная частота повторения циклов при работе системы в непрерывном режиме — 7,5 Гц. При проведении измерений на площади 100×100 мм система обеспечивает пространственное разрешение 0,1 мм. Точность определения толщины составляет 5–10 мкм для пленок толщиной 200–400 мкм.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Распределения мгновенной и осредненной толщины в нагреваемой пленке жидкости показаны на рис. 2 ( $X_r$  — расстояние от верхнего края нагревателя,  $Z$  — координата поперек течения пленки). Выделена область шириной 40 мм в центральной части нагревателя. Приведены как мгновенные (рис. 2, *a, b*), так и осредненные по 30 измерениям значения толщины пленки (рис. 2, *c, d*). Поскольку в методе флуоресцентной визуализации производится обработка изображений большого размера, при выборе количества реализаций, используемых для получения осредненной картины течения, приходится идти на компромисс между точностью результата осреднения и объемом используемой информации. При осреднении по 30 реализациям для указанного режима течения среднеквадратичное отклонение толщины пленки в нижней части нагревателя составляет 10–15 мкм вдоль гребней струй и 7–12 мкм в межструйной области, что представляется авторам приемлемым уровнем погрешности для проведения количественного анализа. Заметим, что при осреднении по 10 реализациям среднеквадратичные отклонения в указанных областях составляют соответственно 20–30 мкм и 15–20 мкм. В ряде случаев (при очень больших поперечных деформациях) и эти величины могут рассматриваться как достаточные для правильного описания режимных особенностей течения.

При увеличении плотности теплового потока амплитуда волн (значения максимальных толщин пленки) возрастает. При  $q = 0,64$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдается формирование струйных течений (рис. 2, *a, c*). Хотя на мгновенном распределении толщины

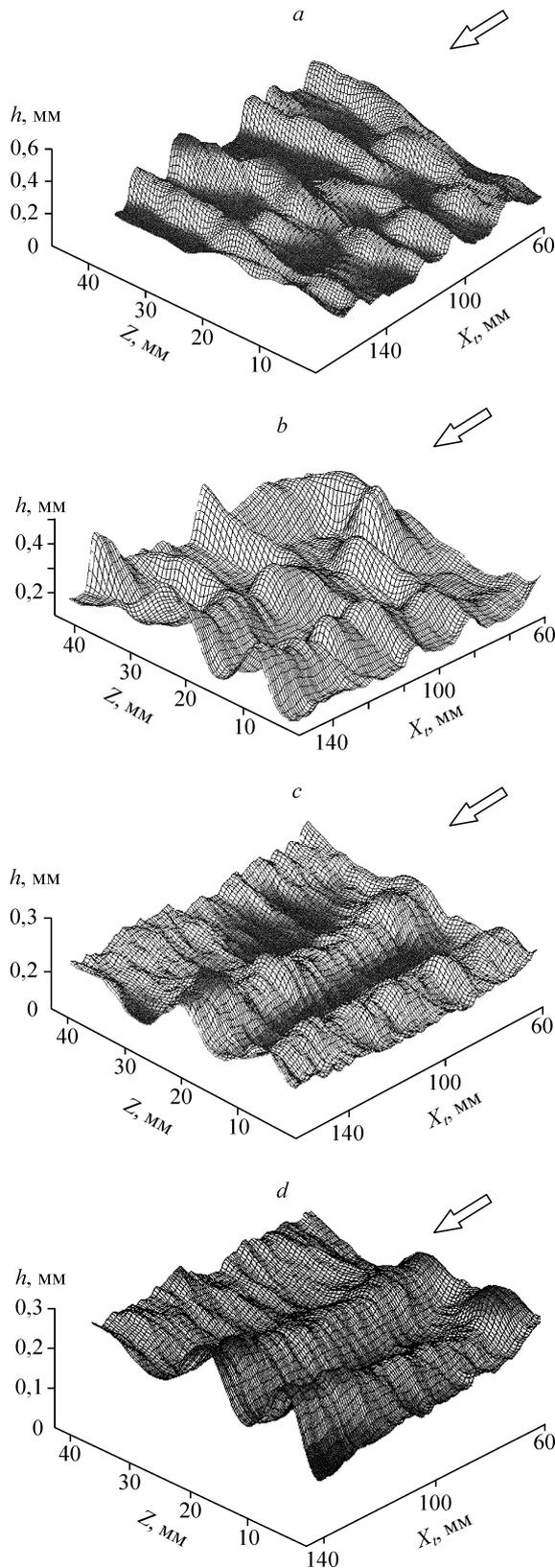


Рис. 2. Распределения толщины в нагреваемой пленке жидкости. Мгновенные:  $q = 0,64$  (a),  $1,15$  (b) Вт/см<sup>2</sup>; осредненные по 30 измерениям:  $q = 0,64$  (c),  $1,15$  (d) Вт/см<sup>2</sup>.

формирование струй еще нельзя обнаружить, усредненное значение толщины поперек потока становится неравномерным. При  $q = 1,15$  Вт/см<sup>2</sup> струи четко различимы (рис. 2, b, d). Среднее и максимальное (амплитуда крупных волн) значения толщин пленки на гребне струи возрастают, а в межструйной зоне убывают. По гребню струи распространяются волны с большой амплитудой, а в межструйной зоне амплитуда волн существенно меньше. Ширина крупных трехмерных волн может существенно изменяться во времени. В результате в межструйной области так же могут проходить отдельные волны с относительно высокой амплитудой.

На рис. 3 показаны волновые характеристики течения пленки в межструйной области и на гребне струи вдоль течения пленки. Видно, что значение толщины и величина амплитуды крупных волн вдоль течения пленки убывают в межструйной зоне.

Зависимость амплитуды  $h_{\max} - h_{\min}$  от безразмерного расстояния вдоль нагревателя показана на рис. 4 ( $L$  — длина нагревателя). Представлена зависимость амплитуды от безразмерного расстояния вдоль нагревателя для изотермической пленки воды (штриховая линия), построенная по результатам работы [3], для полных длин пробега  $X = X_n + X_t$  равных 190 и 360 мм.

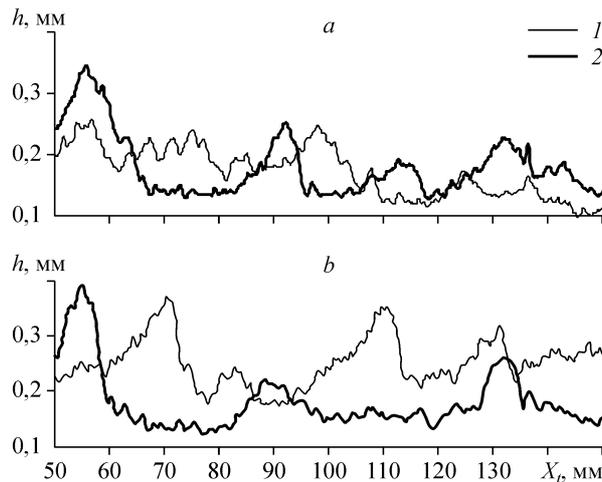


Рис. 3. Сравнение волновых характеристик в межструйной области (а) и струе (b) при разных плотностях тепловых потоков  $q = 1,21$  (1),  $1,15$  (2) Вт/см<sup>2</sup>.

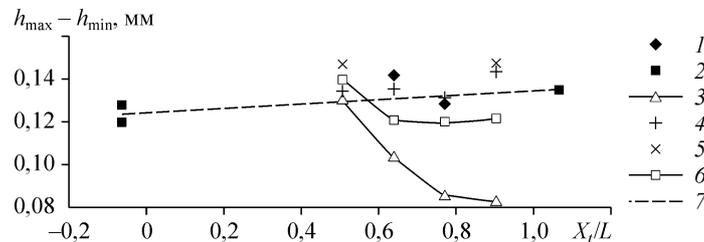


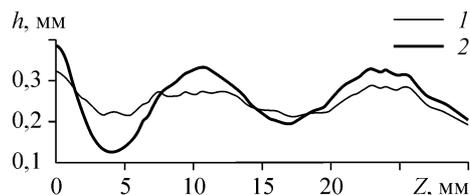
Рис. 4. Зависимость амплитуды  $h_{\max} - h_{\min}$  от безразмерного расстояния вдоль нагревателя. Межструйная область:  $q = 0$  (1), данные из [3] (2),  $1,15$  (3),  $0,64$  (6) Вт/см<sup>2</sup>, область струи:  $q = 1,15$  (4),  $0,64$  (5) Вт/см<sup>2</sup>, зависимость для изотермической пленки (7) [3].

С увеличением безразмерной длины пробега пленки вдоль нагревателя  $X_t/L$  наблюдается рост амплитуды. Полученные в работе данные в отсутствие нагрева соответствуют зависимости для изотермической пленки. При нагреве, начиная с середины нагревателя, в межструйной области происходит уменьшение толщины пленки и амплитуды волн, тем большее, чем выше плотность теплового потока.

Профили толщин пленки жидкости, осредненные по 30 измерениям в горизонтальном сечении, расположенном на 6 мм выше нижнего края нагревателя ( $X_t = 144$  мм), при разных плотностях теплового потока показаны на рис. 5. Выделена область шириной 30 мм в центральной части нагревателя. В отсутствии нагрева средняя толщина пленки постоянна. Формирование струйных течений начинается при  $q = 0,64$  Вт/см<sup>2</sup>. С увеличением плотности теплового потока среднее значение толщины пленки на гребне струи возрастает, а в межструйной зоне убывает.

Поперечные деформации, определяемые как разница между средней толщиной пленки на гребне струи и в межструйной области, деленная на начальную толщину пленки  $Def = (h_{\text{стр}} - h_{\text{впад}})/h_0$  (рис. 6, а), увеличиваются с ростом плотности теплового потока и длины пробега пленки вдоль нагревателя. При течении пленки жидкости по протяженным

Рис. 5. Поперечные сечения пленки.  $q = 0,64$  (1),  $1,15$  (2) Вт/см<sup>2</sup>.



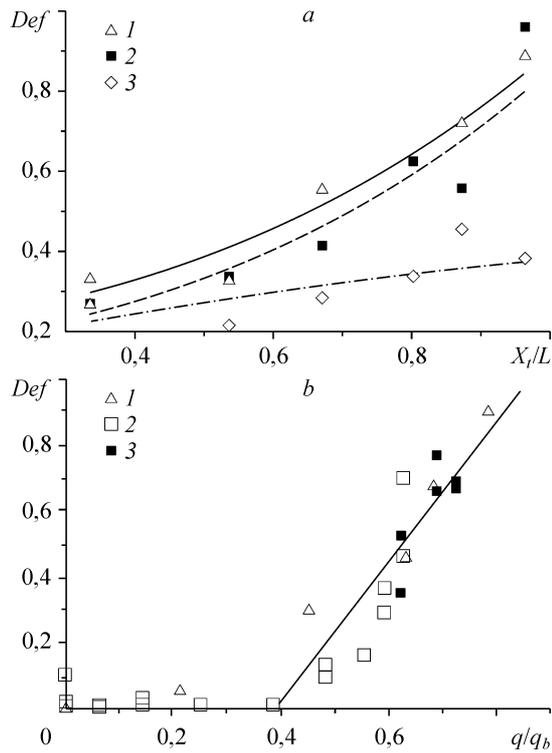


Рис. 6. Зависимости поперечных деформаций: *a* — от длины пробега пленки вдоль нагревателя,  $q = 1,21$  (1), 1,15 (2), 0,64 (3) Вт/см<sup>2</sup>, *b* — от безразмерной плотности теплового потока, емкостный метод, данные из [9, 11]:  $Re = 22$  (1), 33 (2); флуоресцентный метод:  $Re = 33$  (3).

нагревателям струи достаточной ширины развиваются в области трехмерной неустойчивости волн. Неоднородности в толщине пленки жидкости поперек потока приводят к неоднородностям температуры на поверхности пленки жидкости [9]. В области утончения пленки жидкости температура выше. Возникает поперечный градиент температуры, приводящий к появлению термокапиллярных касательных напряжений и увеличению деформации толщины пленки

жидкости. Максимальные деформации наблюдаются в нижней части нагревателя.

На рис. 6, *b* приведены поперечные деформации пленки, определенные емкостным [9, 11] и флуоресцентным методами в нижней части нагревателя ( $X_i = 144$  мм). Видно, что влияние плотности теплового потока на толщину пленки и амплитуду крупных волн не равномерно. Можно выделить область слабого влияния плотности теплового потока примерно до  $q = 0,4q_b$  ( $q_b$  — плотность теплового потока, соответствующая разрыву пленки), в которой практически нет изменений в толщине пленки жидкости. При  $q > 0,4q_b$  происходит интенсивное формирование струй, сопровождающееся значительным влиянием плотности теплового потока на поперечную деформацию.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнены количественные измерения мгновенного поля толщин нагреваемой пленки жидкости с использованием флуоресцентного метода. Зарегистрирован процесс формирования струй в неизотермической пленке жидкости. Осреднение измерений позволило определить степень поперечной деформации пленки.

Выделены две области влияния плотности теплового потока на характеристики волнового течения пленки жидкости. При малых тепловых потоках  $q < 0,4q_b$  течение пленки не деформировано и практически не отличается от изотермического течения. При высоких тепловых потоках термокапиллярные силы приводят к формированию струй и тонкой пленки между ними. В межструйной области толщина пленки и амплитуда волн уменьшаются с увеличением плотности теплового потока. Трехмерные волны распространяются по гребням струй, где с ростом плотности теплового потока толщина пленки и амплитуда волн увеличиваются. Существенное изменение амплитуды волн наблюдается в нижней половине нагревателя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Joo S. W., Davis S.H.** Instabilities of three-dimensional viscous falling films // *J. Fluid Mech.* — 1992. — Vol. 242. — P. 529–547.
2. **Liu J., Schneider J. B., Golub J.P.** Three-dimensional Instabilities of Film Flows // *Phys. Fluids.* — 1995. — Vol. 7, No. 1. — P. 55–67.
3. **Drosos E.I.P., Paras S.V., Karabelas A.J.** Characteristics of developing free falling films at intermediate Reynolds and high Kapitza numbers // *Inter. J. Multiphase.* — 2004. — No. 30. — P. 853–876.
4. **Norman W.S., McIntyre V.** Heat transfer to liquid film on a vertical surface // *Trans. Instn. Chem. Engin.* — 1960. — Vol.38, No. 6. — P. 301–307.
5. **Кабов О.А.** Теплоотдача от нагревателя с малым линейным размером к свободно стекающей пленке жидкости // *Тр. Первой Росс. нац. конф. по теплообмену.* — М.: Изд-во МЭИ. — 1994, Т. 6. — С. 90–95.
6. **Kabov O.A., Diatlov A.V., Marchuk I.V.** Heat transfer from a vertical heat source to falling liquid film // *Proc. of the First Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation / Eds. G.P. Celata and R.K. Shah, 9-11 October, 1995.* — Rome, Italy. — Vol. 1. — P. 203–210.
7. **Joo S. W., Davis S.H., Bankoff S.G.** A mechanism for rivulet formation in heated falling films // *J. Fluid Mech.* — 1996. — Vol. 321. — P. 279–298.
8. **Чиннов Е.А., Кабов О.А.** Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // *ПМТФ.* — 2003. — Т. 44, № 5. — С. 128–137.
9. **Чиннов Е.А.** Гидродинамика и теплообмен в капиллярных течениях с естественной циркуляцией. Дис. докт. физ.-мат. наук. — Новосибирск, 2004. — 347 с.
10. **Зайцев Д.В., Чиннов Е. А., Кабов О.А., Марчук И.В.** Экспериментальное исследование волнового течения пленки жидкости по нагреваемой поверхности // *Письма в ЖТФ.* — 2004. — Т. 30, Вып. 6. — С. 31–37.
11. **Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Кабов О.А., Серов А.Ф.** Измерение волновых характеристик неизотермической пленки жидкости емкостным методом // *Теплофизика и аэромеханика.* — 2004. — Т. 11, № 3. — С. 441–447.
12. **Chinnov E.A., Kabov O.A., Marchuk I.V., Zaitsev D.V.** Heat transfer and breakdown of subcooled falling liquid film on a vertical middle size heater // *Inter. J. Heat Technol.* — 2002. — Vol. 20, No. 1. — P. 69–78.
13. **Johnson M.F. G., Schluter R.A., Bankoff S.G.** Fluorescent imaging system for global measurement of liquid film thickness and dynamic contact angle in free surface flows // *Rev. Sci. Instrum.* — 1997. — Vol. 68, No. 11. — P. 4097–4102.
14. **Алексеев С.В., Антипин В.А., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М.** Стационарные уединенные трехмерные волны на вертикально стекающей пленке жидкости // *Докл. Акад. наук.* — 2005. — Т. 405, № 2. — С. 193–195.

*Статья поступила в редакцию 16 ноября 2006 г.*