

А. Н. Чернявский, А. Н. Павленко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: cherny@ngs.ru

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ ВСКИПАНИЯ В СТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНОВОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ *

Представлена математическая модель, позволяющая рассчитывать времена ожидания вскипания в стекающих волновых пленках жидкости при нестационарном тепловыделении. Показана необходимость учета конвективной составляющей теплопереноса при моделировании теплообмена в стекающих пленках. Использован эффективный коэффициент температуропроводности, учитывающий вклад конвективной составляющей теплопереноса, рассчитанный по методике Воронцова из среднестатистических волновых характеристик пленки. Представлен способ учета влияния волнового движения на процесс теплообмена. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: пленки жидкости, теплообмен, кипение, время ожидания вскипания, численное моделирование.

Введение

Стекающие пленки жидкости обладают высокой степенью интенсивности процессов теплообмена, благодаря чему широко применяются в различных технологических установках: криогенных аппаратах, устройствах термостабилизации, малоинерционных теплообменниках-дозаторах и для охлаждения высокотемпературных сверхпроводников.

Течение жидкости по вертикальной поверхности неизбежно сопровождается развитием волновых возмущений на свободной поверхности пленки, вносящих существенный вклад в процессы теплообмена и развития кризисных явлений [1–5].

Область высокоэффективного теплообмена при пленочном течении жидкости ограничена по тепловому потоку и су-

щественно зависит от закона тепловыделения.

Достижение системой критического теплового потока приводит к распаду пленочного течения, образованию крупномасштабных несмоченных зон, снижению интенсивности теплоотдачи и, как следствие, резкому росту температуры теплоотдающей поверхности, что может привести к разрушению тепловыделяющего элемента.

Умение рассчитывать критические тепловые потоки и максимально допустимые времена их воздействия для заданной системы необходимо для проектирования стабильно работающих теплообменных устройств.

Время наступления кризиса и сценарий распада пленочного течения характеризуется такими параметрами, как время ожидания вскипания и время полного локального ис-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-08-00118), Интеграционного проекта СО РАН совместно с УрО РАН (№ 68), гранта МНП ИТ СО РАН – 2010, гранта Правительства России № 11.G34.31.0035 (ведущий ученый – В. Е. Захаров, Новосибирский государственный университет).

парения стекающей пленки жидкости. Данные величины определяют максимальные времена воздействия критических тепловых потоков на пленку, обладающую определенными параметрами.

Таким образом, построение математической модели, позволяющей рассчитывать времена ожидания вскипания и полного локального испарения для теплообменных пленочных систем, является актуальной задачей, которая может найти применение в инженерной практике.

Существует большое количество работ, посвященных моделированию процесса волнообразования в условиях пленочного течения жидкости и исследованию влияния волнового движения на развитие процессов теплообмена и диффузии [6–10]. Однако исследований, посвященных моделированию процессов теплообмена в стекающих волновых пленках жидкости при нестационарном тепловыделении, ранее не проводилось.

Результаты экспериментов показывают, что в условиях пленочного охлаждения нагревательной поверхности плотности тепловых потоков превосходят значения, рассчитанные по теории Нуссельта, что является следствием существенности конвективной составляющей теплообмена [3; 5]. В работе [1] показано, что в первом приближении данный эффект может быть учтен путем введения эффективного коэффициента температуропроводности.

Целью данной работы является построение математической модели, позволяющей в первом приближении рассчитывать времена ожидания вскипания и полного локального испарения стекающих волновых пленок жидкости в условиях нестационарного тепловыделения с учетом конвективной составляющей теплообмена.

Постановка задачи

В рамках данной работы время ожидания вскипания будет определяться как время достижения слоем жидкости, прилегающим к нагревательной поверхности, температуры максимального перегрева. Таким образом, гидродинамика пленки и распределение температуры внутри жидкости имеют значение только в той мере, в которой они влияют на теплоотдачу с нагревательной поверхности и соответственно на темпера-

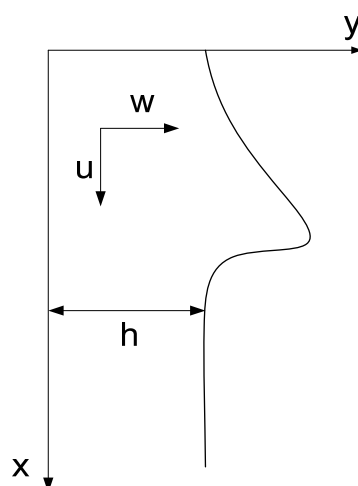


Рис. 1. Направление осей координат

туру в пристеночной области. Использование данного подхода позволяет сделать ряд упрощений, суть которых изложена ниже.

В общем случае теплообмен в стекающей пленке жидкости описывается нестационарным уравнением теплопроводности. При условии независимости физических величин от температуры нестационарное уравнение теплопроводности для двумерной расчетной области имеет следующий вид (направления осей координат показаны на рис. 1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (1)$$

При условии преобладания поперечных (по оси y) тепловых потоков над продольными (по оси x) уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -w \frac{\partial T}{\partial y} + a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (2)$$

Как было сказано ранее, учет наличия конвективного теплопереноса можно осуществить путем введения эффективного коэффициента температуропроводности, рассчитанного по методике Воронцова из среднестатистических волновых характеристик [1]. В указанном выше приближении уравнение (2) примет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_{\text{эфф}} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (3)$$

Таким образом, задача, требующая совместного решения гидродинамической и тепловой подзадач в двумерной расчетной области, сводится к решению одномерного упрощенного уравнения теплопроводности,

требующего знания единственного эмпирического параметра – эффективного коэффициента температуропроводности, и определения границ расчетной области посредством задания начальной толщины пленки (может определяться как эмпирически, так и на основе известных оценочных соотношений).

В рамках данной работы будут рассматриваться пленки жидкости, натекающие на вертикальную нагревательную поверхность на линии насыщения. Таким образом, на свободной поверхности пленки будет реализовываться следующее граничное условие:

$$T|_{y=h} = T_s.$$

Изменение толщины пленки вследствие испарения со свободной поверхности будет описываться следующим уравнением:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho L} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h}.$$

При условии использования тонкостенных нагревательных элементов с малой тепловой инерционностью граничное условие на нагревательной поверхности можно представить в виде

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\frac{q(t)}{\lambda} + \frac{\delta_{\text{наг}} C_{\text{наг}} \rho_{\text{наг}}}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{y=0},$$

что позволяет задать произвольный закон тепловыделения в нагревателе и учесть его тепловую инерционность.

Представленная выше постановка задачи справедлива в случаях, когда время ожидания вскипания значительно меньше характерного времени смены волновой фазы для фиксированной области нагревательной поверхности. В противном случае необходимо явным образом учитывать вклад волнового движения в процесс переноса тепла. В первом приближении данная задача решается посредством введения эффективной толщины пленки жидкости, представляющей собой сумму толщины безволновой пленки и добавки, моделирующей вклад волнового движения:

$$h_{\text{эфф}} = \bar{h} + \tilde{h}.$$

Задание «волновой» добавки требует использования некоторых предположений о геометрии волновой поверхности, а также знания волновых характеристик описываемого течения. В первом приближении в рамках данной математической модели вклад волнового движения может быть описан синусоидальной добавкой к толщине пленки жидкости.

Результаты численного моделирования

Приведенная выше математическая постановка использовалась при выполнении моделирования теплообмена в стекающих пленках жидкого азота. Решение уравнения (3) производилось методом конечных разностей с использованием неявной схемы аппроксимации.

В рамках данной работы было выполнено сравнение результатов численного моделирования с результатами экспериментов, представленными в работах [3; 5]. Начальные условия, закон тепловыделения и параметры нагревателя были заданы в соответствии с параметрами экспериментального участка. При расчете эффективного коэффициента температуропроводности использовались среднестатистические волновые характеристики, представленные в работах [2; 11].

На рис. 2 приведены опытные и расчетные данные по временам ожидания вскипания в стекающих пленках жидкого азота при различных тепловых потоках и числах Рейнольдса в условиях ступенчатого тепловыделения: 1 – экспериментальные данные; 2, 3 – расчет при кондуктивном законе теплообмена; 4, 5 – расчет с учетом конвективной составляющей теплообмена; 2, 4 – расчеты для областей поверхности нагревателя, находившихся на момент подачи тепловой нагрузки в середине остаточного слоя; 3, 5 – под гребнями волн.

На представленных рисунках кривые 2 и 3 лежат существенно ниже экспериментальных данных. В то же время кривые 4 и 5 удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента, что подтверждает необходимость учета конвективной составляющей теплообмена при расчете времени ожидания вскипания.

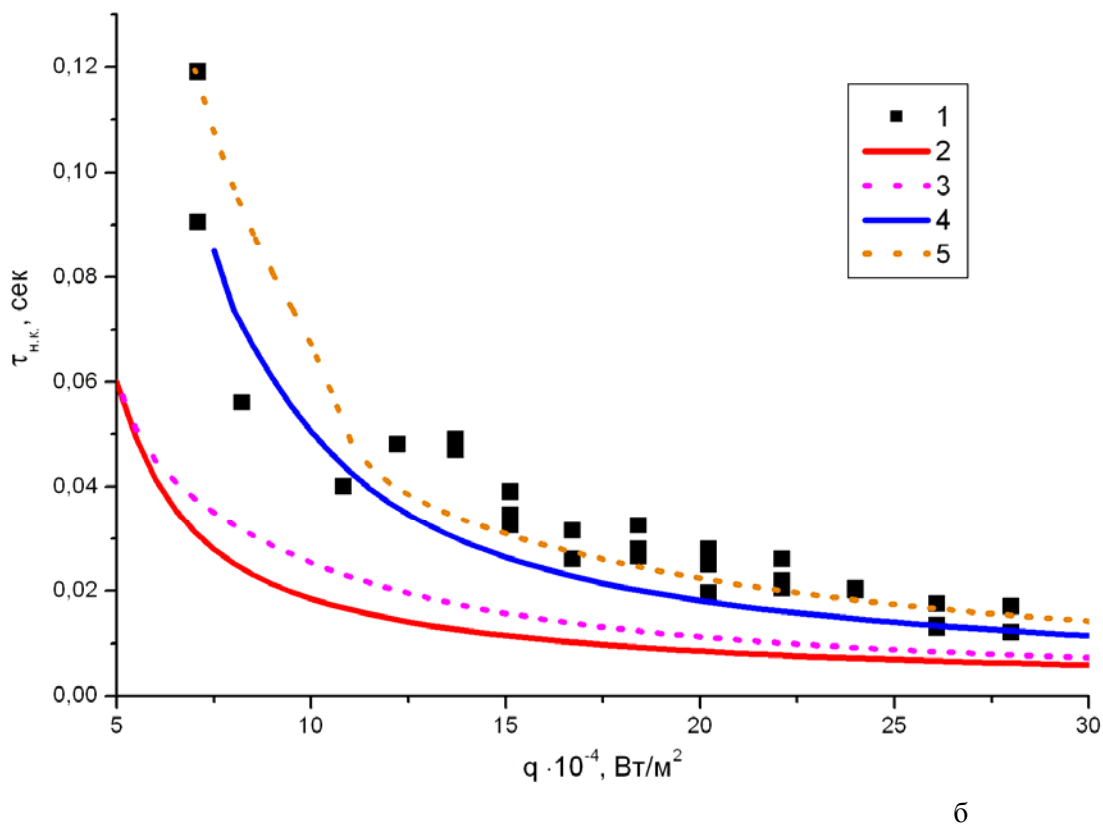
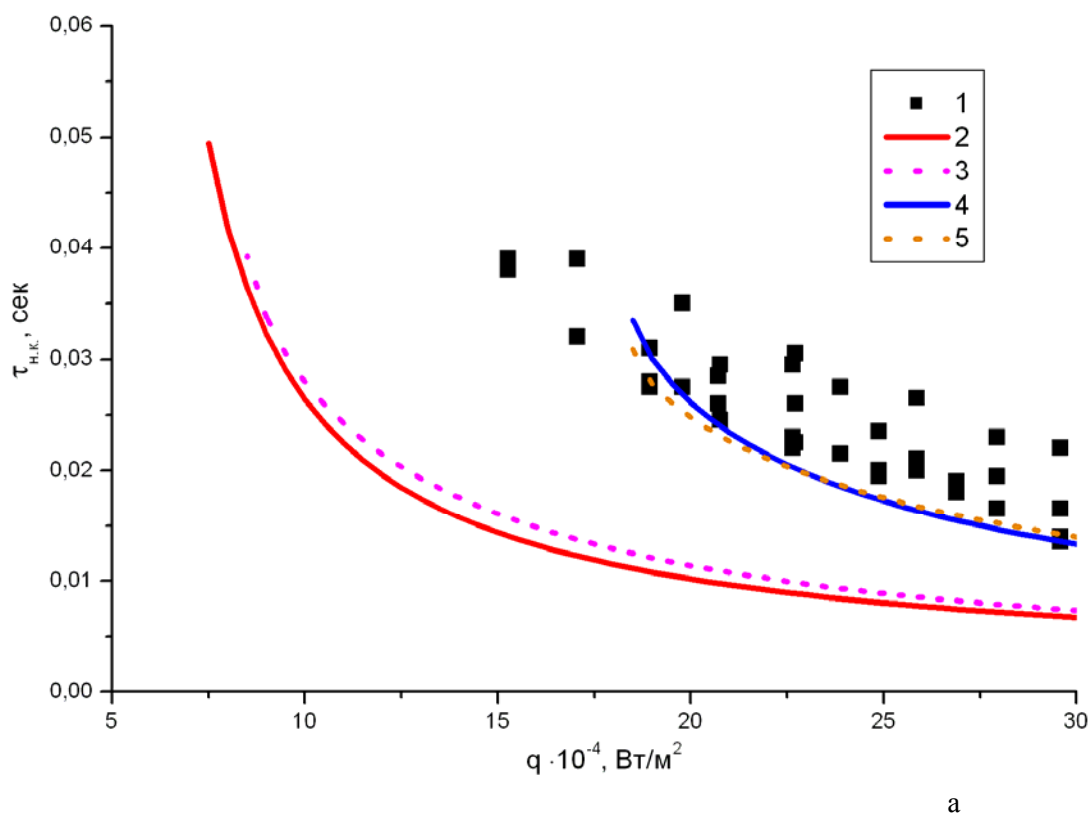


Рис. 2. Время ожидания вскипания: а – $Re_{вх} = 111$; б – $Re_{вх} = 847$

В результате движения волн различные области нагревательной поверхности в различные моменты времени могут находиться как под остаточным слоем, так и под гребнем волны. Это объясняет, почему кривые 3 и 5 могут лежать выше кривых 2 и 4 соответственно, а кривые 4 и 5, а также кривые 2 и 3 могут сходиться и пересекаться. Из вышесказанного следует, что вскипание может происходить в различных областях нагревательной поверхности в зависимости от волновых характеристик пленки, теплофизических свойств жидкости и подводимого теплового потока.

Выводы и заключение

В рамках данной работы была построена математическая модель, позволяющая в первом приближении рассчитывать время ожидания вскипания в стекающих волновых пленках жидкостей.

Посредством сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными показана необходимость учета конвективной составляющей теплообмена при расчете времени ожидания вскипания в условиях пленочного течения жидкости.

При использовании эмпирически определяемого эффективного коэффициента температуропроводности результаты численного моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Список обозначений

x – координата вниз по течению пленки, м;

y – поперечная координата, м;

u – скорость в направлении x , м/с;

w – скорость в направлении y , м/с;

h – локальная толщина пленки, м;

$h_{\text{эфф}}$ – эффективная локальная толщина пленки, м;

T – температура, К;

$\tau_{\text{н.к.}}$ – время ожидания вскипания, с;

q – плотность теплового потока, Вт/м²;

$\delta_{\text{наг}}$ – толщина нагревателя, м;

$C_{\text{наг}}$ – удельная теплоемкость нагревателя, Дж/(кг·К);

$\rho_{\text{наг}}$ – плотность материала нагревателя, кг/м³;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

$a_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент температуропроводности, м²/с;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Список литературы

1. *Воронцов Е. Г.* Температуропроводность стекающих пленок // Теоретические основы химической технологии. 1999. Т. 33, № 2. С. 117–127.

2. *Павленко А. Н. и др.* Теплообмен и кризисные явления при интенсивном испарении в стекающих волновых пленках жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 1. С. 93–105.

3. *Павленко А. Н., Суртаев А. С., Мачух А. М.* Переходные процессы в стекающих пленках жидкости // ТВТ. 2007. Т. 45, № 6. С. 905–916.

4. *Pavlenko A. N., Surtaev A. S., Chernyavskii A. N.* Breakdown of a Falling Wave Liquid Film during Nonstationary Heat Release // Heat Transfer Research. 2008. Vol. 39. Iss. 6. P. 509–517.

5. *Pavlenko A. N., Surtaev A. S., Chernyavskii A. N., Volodin O. A.* Development of Heat Transfer and Crisis Phenomena in Falling Wavy Liquid Films at Nonstationary Heat Release // Proc. of 5th Int. Conf. on Transport Phenomena in Multiphase Systems «Heat 2008». Bialystok, 2008. Vol. 2. P. 131–138.

6. *Гешев П. И., Ездин Б. С.* Расчет профиля скорости и формы волны на стекающей пленке жидкости // Гидродинамика и теплообмен течений жидкости со свободной поверхностью. Новосибирск, 1985. С. 49–58.

7. *Miyara A.* Numerical Analysis on Heat Transfer of Falling Liquid Films with Interfacial Waves // Proc. of 11th IHTC (Heat Transfer Conference). Kyondju, 1998. Vol. 2. P. 57–62.

8. *Miyara A.* Numerical Analysis on Heat Transfer Enhancement by Waves on Falling Liquid Film // Journal of Thermal Science. 2000. Vol. 9. No. 3. P. 236–242.

9. *Демехин Е. А., Калайдин Е. Н., Растатурин А. А.* Влияние волновых режимов на массообмен в стекающих пленках жид-

кости // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 259–269.

10. Roberts R. M., Chang H.-C. Wave-Enhanced Interfacial Transfer // Chemical Engineering Science. 2000. № 55. P. 1127–1141.

11. Pavlenko A. N. et al. The Growth of Wave Amplitude and Heat Transfer in Falling

Intensively Evaporating Liquid Films // Journal of Engineering Thermophysics. 2002. Vol. 11. No. 1. P. 7–43.

Материал поступил в редколлегию 05.03.2012

A. N. Chernyavskiy, A. N. Pavlenko

**SEMIEMPIRICAL METHOD OF BOILING EXPECTATION TIME CALCULATION
IN FALLING WAVY LIQUID FILM**

The Mathematical model which allows to calculate boiling expectation times in falling wavy liquid films on nonsteady heat release has been represented. It has been shown that it is necessary to take a convective constituent of a heat transfer into account in heat exchange modeling in falling films. The effective thermal conductivity coefficient which involves a convective constituent of a heat transfer calculated from average wave characteristics using Vorontsov method has been used. The method of accounting of the wave moving influence on a heat exchange process has been presented. The comparison of results of a numerical simulation and experimental data has been done.

Keywords: liquid films, heat exchange, boiling, boiling expectation time, numerical simulation.