

ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В СТЕКАЮЩИХ ВОЛНОВЫХ ПЛЁНКАХ ЖИДКОСТИ

АННОТАЦИЯ

В работе представлены экспериментальные данные по локальному теплообмену и кризисным явлениям в стекающих плёнках жидкого азота на тонкостенных малоинерционных нагревательных поверхностях, обеспечивающих граничное условие $q \approx \text{const}$. Исследования проводились при стационарном и нестационарном законах тепловыделения. С помощью высокоскоростной цифровой видеосъемки выявлена динамика переходных процессов при ступенчатом и периодическом импульсном набросах тепловой нагрузки. Получены опытные данные по величине критического теплового потока в зависимости от длительности и времени между импульсами при изменении степени орошения в широком диапазоне. Показано, что в кризисных режимах характер вскипания, механизмы возникновения и развития сухих пятен в стекающей волновой плёнке жидкости существенно зависят от плотности теплового потока, числа Рейнольдса на входе и длины теплоотдающей поверхности вдоль течения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Плёночные течения жидкостей (в том числе криогенных) широко используются в различных технологических процессах для интенсификации теплопереноса. Испарение в тонких плёнках жидкости обеспечивает при малых расходах и низких температурных напорах высокую интенсивность теплообмена. Испарители с плёночным течением жидкостей находят широкое применение в дистилляционных установках, компактных теплообменниках периодического действия, системах охлаждения и термостабилизации, в крупномасштабных аппаратах по сжижению природного газа, в пищевой промышленности.

В последнее время опубликовано большое количество работ по изучению структуры течения, теплообмена и кризисных явлений при стационарном тепловыделении как в недогретых до температуры насыщения плёнках жидкости, так и в условиях испарения и кипения. Как показывает анализ литературы, исследования теплообмена и переходных процессов при нестационарном тепловыделении в стекающих плёнках жидкости отсутствуют.

В работе [1] обнаружено, что в стекающих по обогреваемой поверхности плёнках, глубоко недогретых до температуры насыщения, быстрый рост возмущений приводит к образованию метастабильных регулярных структур в остаточном слое жидкости, существующих в период между последовательным прохождением крупных двухмерных волн.

В настоящее время отсутствуют расчётные соотношения, которые бы позволили учесть влияние плотности теплового потока на интенсивность теплопереноса в режимах интенсивного испарения волновых плёнок жидкости, включая предкризисные режимы с образованием нестационарных и устойчивых сухих пятен. Влияние эффектов интенсивного испарения на динамику волнового плёночного течения, взаимосвязь между волновыми характеристиками и локальным нестационарным теплообменом в этих условиях экспериментально практически не исследовались, за исключением работ [2–5].

Как показывает анализ литературы, практически не исследован вопрос о влиянии теплофизических свойств, толщины теплопередающей стенки на теплообмен при интенсивном испарении, на условия возникновения сухих пятен и развитие кризиса осушения при волновом плёночном течении жидкости. В условиях интенсивно испаряющейся волновой плёнки жидкости величина локального коэффициента теплоотдачи будет существенно зависеть как от времени, так и от положения точек измерения вдоль течения. Предельные граничные условия $T_{\text{ст}} = \text{const}$ и $q_{\text{ст}} = \text{const}$ при неравномерном распределении локального коэффициента теплоотдачи вдоль теплоотдающей поверхности в реальных условиях эксперимента практически не достижимы. Использование толстостенных высокотеплопроводных нагревателей при заданных безразмерных линейных масштабах обеспечивает граничные условия, близкие к $T_{\text{ст}} = \text{const}$. Проведение опытов на низкотеплопроводных тонкостенных образцах позволяет получать граничные условия, близкие к $q_{\text{ст}} = \text{const}$.

Целью данной работы является экспериментальное исследование локального теплообмена, динамики развития кризисных явлений при различных законах тепловыделения на тонкостенных нагревателях различной протяжённости вдоль течения волновой плёнки жидкости.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Опыты проводились на экспериментальном участке, помещённом в адиабатически изолированный оптический криостат. Схемы экспериментальной установки, систем поддержания заданного расхода жидкости, плёнокоформирователя детально описаны в работе [6]. Визуализация течения и высокоскоростная видеосъемка осуществлялись через четыре оптических окна с помощью цифровой ви-

деокамеры Phantom v.7.0 (максимальная частота записи 4800 кадр/с при разрешении 800x600 пикселей).

Схема обогреваемой секции экспериментального участка представлена на рис. 1. Фольга из константана 1 толщиной 25 мкм и длинами 30 и 122 мм соответственно натягивалась на текстолитовую рамку 2 при помощи двух пружин, размещённых в нижней части нагревателя. Тепловыделение на поверхности фольги осуществлялось пропусканием стабилизированного тока с использованием двух токоподводящих медных шин 3, расположенных на концах рабочего участка. Плотность теплового потока измерялась по показаниям величины тока, пропускаемого через фольгу и разности потенциалов между клеммами, расположенными на концах рабочего участка. Для устранения отвода тепла от тепловыделяющей поверхности с обратной стороны (между текстолитовой рамкой и участком) находился теплоизолятор-пенопласт 4. Температура фольги измерялась с помощью четырёх локальных платиновых термодатчиков сопротивления (HEL-700) 5, абсолютная погрешность которых в области криогенных температур составляла $\pm 0,1$ К. Сбор данных осуществлялся с помощью платы АЦП и программы, разработанной в среде программирования LabVIEW 7.0 для автоматизации данного экспериментального исследования.

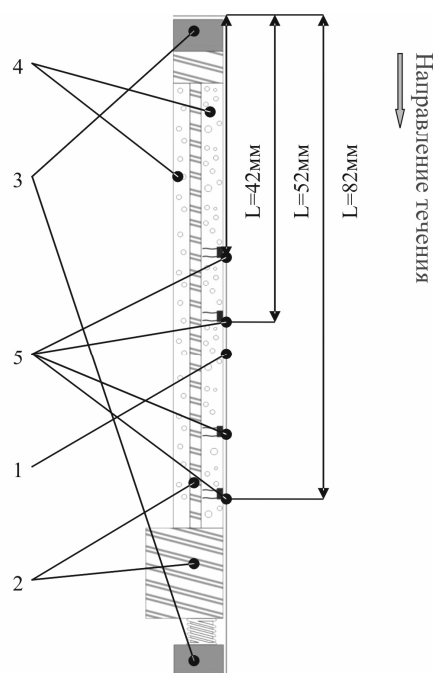


Рис. 1. Схема обогреваемой секции: 1 – нагревательная фольга длиной 122 мм (константан); 2 – рамка (текстолит); 3 – токоподводящие шины (медь); 4 – теплоизолятор (пенопласт); 5 – платиновые датчики температуры

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В разделе представлены результаты экспериментального исследования локального теплообмена при гравитационном плёночном течении жидкого азота в ламинарно-волновом режиме. Опытные данные

получены при испарении волновой плёнки, стекающей по тонкостенному вертикальному нагревателю, удовлетворяющему граничному условию $q_{ст} \approx const$ в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_{вх} = 60-690$.

На рис. 2 а, б представлены опытные данные по величине локального коэффициента теплоотдачи в различных точках теплоотдающей поверхности в зависимости от плотности теплового потока при различных числах Рейнольдса. Такое поведение зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока характерно и для других степеней орошения поверхности нагревателя, также исследованных в эксперименте.

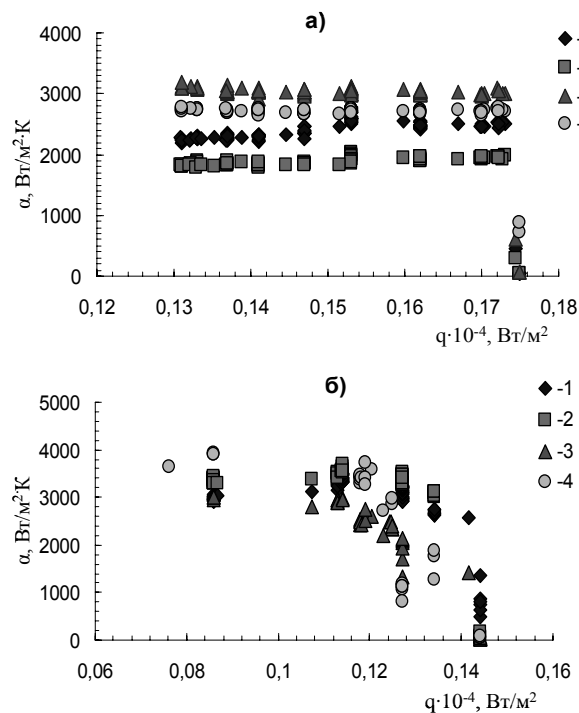


Рис. 2. Зависимости локального коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока:

а – $Re_{вх} = 162$, $q_{с.п} = 0,174 \cdot 10^4$ Вт/м²; б – $Re_{вх} = 91$, $q_{с.п} = 0,127 \cdot 10^4$ Вт/м²; 1–4 – расстояние от начала обогреваемой поверхности – 42; 52; 72; 82 мм соответственно

Видно, что при наступлении кризиса теплообмена при увеличении плотности теплового потока коэффициент теплоотдачи резко снижается. В докризисной зоне его величина слабо зависит от теплового потока. Из анализа опытных данных для мгновенной температуры теплоотдающей поверхности следует, что наиболее сильные флуктуации величины коэффициента теплоотдачи наблюдаются в области тепловых потоков, при которых возникает сухие пятна. Связано это с тем, что в момент наступления кризиса и частичного осушения обогреваемой поверхности возникают значительные колебания температуры теплоотдающей стенки.

С использованием высокоскоростной видеосъемки была произведена регистрация течения ламинарно-волновой плёнки при различных тепловых потоках и числах Рейнольдса на входе. На рис. 3 представлен фрагмент видеосъемки течения плёнки

жидкости в критическом режиме, при котором возникают стабильные крупномасштабные сухие пятна. В нижней части поверхности нагрева поведение границы смачивания существенно нестационарно и характеризуется периодическим развалом на два или несколько «язычков».



Рис. 3. Кадр высокоскоростной видеосъемки: $Re_{вх}=690$, $q = 1,1 \cdot 10^4$ Вт/м². Плёночное течение жидкого азота при наличии стабильных несмоченных зон

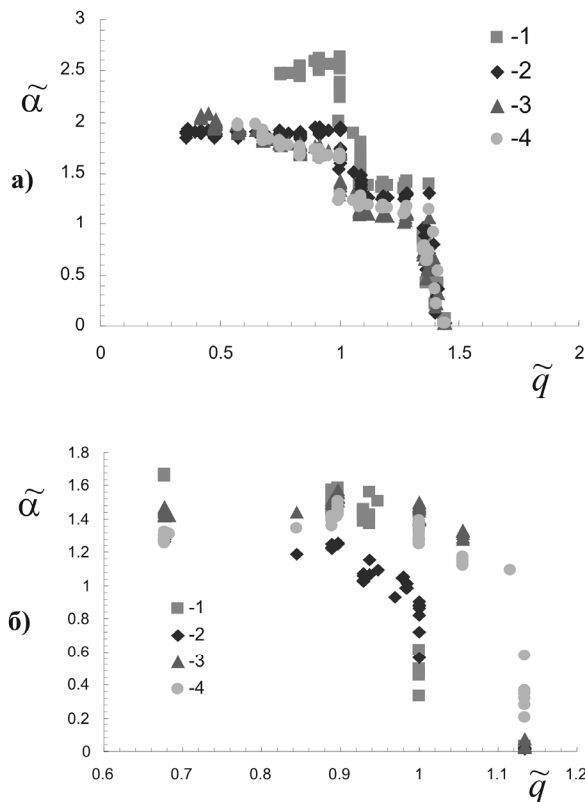


Рис.4. Зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при различных степенях орошения в безразмерном виде: *a* – $Re_{вх}=690$; *б* – $Re_{вх}=91$; 1–4 – расстояние от начала обогреваемой поверхности – 82; 72; 52; 42 мм соответственно

Для сравнения экспериментальных данных с полуэмпирической зависимостью Гимбутиса [7]:

$$\frac{\alpha_{исп}}{\lambda} \left(\frac{v'^2}{g} \right)^{1/3} = 1,1 (Re_{лок})^{-1/3} \left[1 + 0,02 (Re_{лок})^{0,2} + 0,0009 (Re_{лок})^{0,85} Pr'^{0,65} \right],$$

полученной для слабо испаряющихся стекающих плёнок жидкости, величина локального коэффициента теплоотдачи на рис. 4 *a*, *б* представлена в безразмерной форме. Плотность теплового потока обезразмерена на плотность, при которой на тепловыделяющей поверхности образуются устойчивые сухие пятна. В данном соотношении локальное число Рейнольдса $Re_{лок}$ рассчитывалось по тепловому балансу для каждой точки измерения. На графиках наблюдается увеличение интенсивности теплообмена по сравнению с теплоотдачей, рассчитанной по зависимости Гимбутиса. Анализ полученных данных, представленных на рисунке в безразмерной форме, показал, что увеличение интенсивности теплообмена изменяется в диапазоне 20–250% в зависимости от числа Рейнольдса и локальной координаты вдоль течения. Наиболее сильное превышение опытных данных наблюдается при максимальном числе Рейнольдса, исследованном в опытах. Такое поведение зависимости опытных данных на тонкостенном нагревателе для величины локального коэффициента теплоотдачи от теплового потока также наблюдалось в работе [2] при исследовании стекания плёнки жидкости вдоль нагревательной поверхности с граничным условием на стенке $T_{ст} \sim const$ в области тепловых потоков, соответствующих интенсивному испарению.

Результаты первых опытов при нестационарном тепловыделении показали, что при ступенчатом набросе тепловой нагрузки характер вскипания жидкости существенно зависит от распределения толщины волновой плёнки жидкости на теплоотдающей поверхности и плотности теплового потока, определяющих темп нарастания температуры в фиксированных точках вдоль течения. При числах Рейнольдса, соответствующих ламинарно-волновой плёнке ($Re_{вх}=700-1400$), вскипание жидкости происходит в первую очередь в гребнях крупных волн, где тепловой слой не успевает прорасти до свободной поверхности и не развивается механизм интенсивного испарения. При увеличении теплового потока при набросе взрывное вскипание может происходить во всех зонах волновой плёнки жидкости вдоль теплоотдающей поверхности. При ступенчатом тепловыделении для чисел Рейнольдса $Re_{вх} < 100$ в области тепловых потоков $q < < 15 \cdot 10^4$ Вт/м² развитие теплообмена на первой стадии происходит в режиме интенсивного испарения. Далее наблюдается полное испарение остаточного слоя жидкости между гребнями крупных волн. Возникшие сухие пятна начинают быстро распространяться по теплоотдающей поверхности, вытесняя

зоны плёночного течения жидкости. В окрестности границ смачивания возникает интенсивное вскипание жидкости, сопровождающееся её интенсивным диспергированием. При большей тепловой нагрузке переходный процесс развивается значительно быстрее (фрагменты высокоскоростной видеосъемки представлены на рис. 5). В процессе распространения фронтов осушения также наблюдается интенсивное разбрызгивание жидкости. Оставшаяся на теплоотдающей поверхности в смоченных зонах вскипающая жидкость быстро сворачивается в жгуты, затем формируются большие капли, которые отделяются от поверхности нагревателя после достижения критических температур.

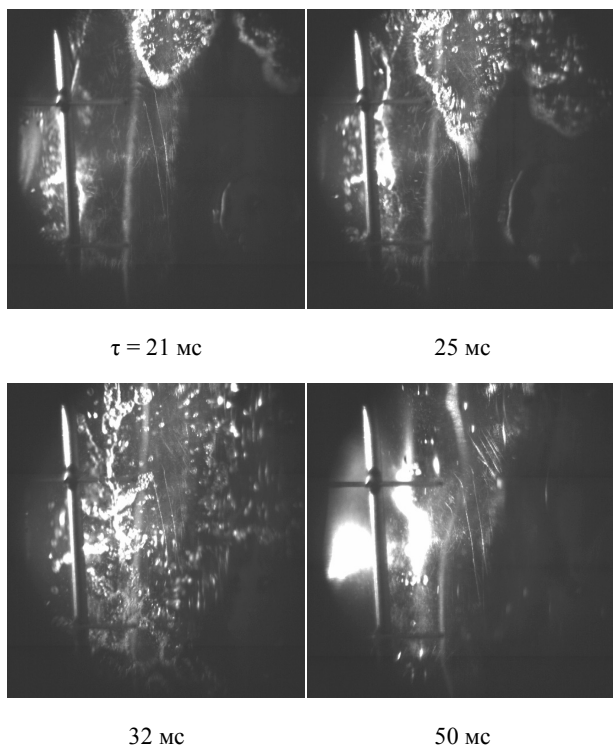


Рис. 5. Динамика осушения теплоотдающей поверхности при ступенчатом тепловыделении: $q = 18.4 \cdot 10^4$ Вт/м²; $Re_{вх} = 4\Gamma/v' = 91$; τ – время от момента начала тепловыделения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые опытные данные по зависимости локального коэффициента теплоотдачи от теплового потока при различных числах Рейнольдса на тонкостенном нагревателе. Показано, что величина коэффициента теплоотдачи при интенсивном испарении азота лежит существенно выше полуэмпирической зависимости Гимбутиса, полученной при обобщении опытных данных для воды и фреона-11 в области малых тепловых потоков на протяжённых вдоль течения тепловыделяющих поверхностях.

Показано, что флуктуации температуры поверхности, измеряемые в фиксированных точках теплоотдающей поверхности, связаны с колебаниями границы между смоченной и несмоченной зонами.

В условиях ступенчатого тепловыделения при волновом плёночном течении динамика развития кризисных явлений существенно зависит от плотности теплового потока и числа Рейнольдса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант 05-08-18022 -а)

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

g – ускорение силы тяжести, м/с²;
 q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 \bar{q} – безразмерная плотность теплового потока;
 T – температура, К;
 $\Delta T = T_{ст} - T_{нас}$ – температурный напор, К;
 τ – время, с
 Γ – степень орошения, м²/с;
 $\alpha = q/\Delta T$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 $\bar{\alpha}$ – безразмерный коэффициент теплоотдачи;
 λ' – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 ν' – кинематический коэффициент вязкости, м²/с;
 $Pr' = \nu'/\alpha'$ – число Прандтля;
 $Nu_* = \alpha (v'^2/g)^{1/3}/\lambda'$ – модифицированное число Нуссельта;
 $Re = 4\Gamma/\nu'$ – плёночное число Рейнольдса.

Индексы:

вх – входные условия;
 исп – при испарении;
 с.п – сухое пятно;
 ст – относится к нагревательной стенке;
 нас – насыщение;
 лок – локальный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lel V., Stadler H., Pavlenko A., Kneer R.** Evolution of metastable quasi-regular structures in heated wavy liquid films // J. Heat and Mass Transfer. 2006.
2. **Pavlenko A.N., Lel V.V.** Heat transfer and crisis phenomena in falling films of cryogenic liquid // Russ. J. of Eng. Thermophysics. 1997. Vol. 7. № 3, 4. P. 177–210.
3. **Pavlenko A.N., Lel V.V., Serov A.F., Nazarov A.D., Matsekh A.M.** Wave amplitude growth and heat transfer in falling intensively evaporating liquid film // J. of Eng. Thermophysics. 2002. Vol. 11. № 1. P. 7–43.
4. **Pavlenko A.N.** Hydrodynamics and heat transfer in boiling and evaporation in cryogenic falling films and applications // Selected Transactions of NATO Advanced Study Institute. Kluwer Academic Publishers. the Netherlands. 2003. Vol. 99. P. 181–200.
5. **Мацех А.М., Павленко А.Н.** Особенности теплообмена и кризисных явлений в стекающих плёнках криогенной жидкости // Теплофизика и Аэромеханика. 2005. Т.12. №1. С. 105–119.
6. **Павленко А.Н., Печёркин В.В., Лель В.В., Мацех А.М., Суртаев А.С.** Теплообмен и кризисные явления при интенсивном испарении в стекающих волновых жидкостях // Теплофизика и Аэромеханика. 2006. Т.13. №1. С. 113–127.
7. **Гимбутис Г.** Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Мокслас. 1988. С. 232.