

УДК 536.248

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА И КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНКАХ КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТИ*

А.М. МАЦЕХ, А.Н. ПАВЛЕНКО

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

Приведены измерения критической плотности теплового потока и теплоотдачи при течении интенсивно испаряющихся и кипящих пленок жидкого азота, стекающих по вертикальным равномерно обогреваемым поверхностям, а также результаты высокоскоростной визуализации процесса. Исследования проводились на обогреваемых поверхностях шириной 67 мм и длиной 20, 42, 64 мм вдоль течения пленки в диапазоне входного числа Рейнольдса $100 \div 1500$. Показано, что в зависимости от длины обогреваемой поверхности наблюдаются различные сценарии развития кризисных явлений. Прямые экспериментальные измерения и визуализация течения показали наличие ранее не исследованного режима развития кризиса осушения теплоотдающей поверхности, характеризующегося вытеснением пузырькового кипения с обогреваемой поверхности вверх по потоку фронтом смены режимов теплоотдачи и развивающегося в определенных диапазонах режимных параметров течения и длины обогреваемой поверхности. При достижении критической плотности теплового потока в нижней части течения из-за слияния стационарных сухих пятен формируется неустойчивое температурное возмущение, распространяющееся в дальнейшем на всю поверхность теплоотдачи и приводящее к ее осушению. При этом критический тепловой поток перестает описываться известными расчетными зависимостями и характеризуется существенно меньшими относительно расчетных значениями. С помощью высокоскоростной визуализации процесса формирования и распространения фронта осушения теплоотдающей поверхности были выявлены особенности теплообмена на границе сухих пятен, определены их критические размеры, а также сложная двумерная структура переходной зоны распространения температурного возмущения, учет которой требуется для наиболее точного моделирования критического теплового потока в пленках, стекающих по достаточно протяженным поверхностям.

ВВЕДЕНИЕ

Пленочные течения жидкости широко используются в современных технологических процессах и теплообменных аппаратах: в системах жидкостного охлаждения электронных микрочипов, пленочных испарителях, ожижителях природного газа, пищевой промышленности. В последние годы особенно актуальной стала проблема создания эффективных компактных жидкостных систем охлаждения высокопроизводительных графических процессоров, быстродействие и срок жизни которых в существенной мере зависят от эффективности отвода рассеиваемой мощности. При достижении определенных тепловых потоков в стекающей по охлаждаемой поверхности пленке жидкости развиваются кризисные явления, из-за которых может происходить полное осушение теплоотдающей поверхности и ее неконтролируемый разогрев. В подобных ситуациях необходимо надежное предсказание величины критического теплового потока. Выявление фундаментальных

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 03-02-04027).

закономерностей возникновения и развития кризиса в стекающих пленках жидкости затруднено из-за ограниченного количества экспериментальных данных о критическом тепловом потоке в условиях пленочного течения жидкости по обогреваемой поверхности при различных гидродинамических режимах течения.

Широкое использование криогенных жидкостей в современных высокоэффективных системах и аппаратах создает необходимость получения надежной информации по развитию переходных и кризисных явлений при кипении и испарении на различных тепловыделяющих поверхностях в низкотемпературных жидкостях. В то же время исследование теплообмена при кипении и испарении криогенных жидкостей, ряд свойств которых существенно отличается от свойств высокотемпературных жидкостей, важно для углубленного понимания изучаемых процессов, служит способом проверки существующих модельных описаний теплообмена и развития переходных и кризисных явлений.

На основе экспериментально наблюдаемого факта отделения основной части жидкости от теплоотдающей поверхности перед наступлением кризиса предложена полуэмпирическая зависимость [1] для критического потока в области больших чисел Рейнольдса:

$$\frac{q_{кр}}{\rho'' r U} = 0,164 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,867} \left(\frac{\sigma}{\rho' U^2 L} \right)^{1/3} . \quad (1)$$

Ранее подобная зависимость была получена в [2] при обобщении экспериментальных данных по кризису теплоотдачи в условиях струйного орошения теплоотдающей поверхности. В работе [3] показано, что в пленке стекающего фтороуглерода FC-72 интенсивное кипение, предшествующее кризису, нарушало сплошную структуру потока и вызывало отделение большей части жидкости с формированием тонкого испаряющегося подслоя на поверхности нагрева. На основе модели неустойчивости Гельмгольца авторами этой работы предложена полуэмпирическая зависимость

$$\frac{q_{кр}}{\rho'' r U} = 0,121 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{2/3} \left(\frac{\sigma}{\rho' U^2 L} \right)^{0,42} , \quad (2)$$

удовлетворительно описывающая полученные опытные данные на начальном участке при изменении числа Рейнольдса в диапазоне $2000 \div 8000$ и определяющего параметра $\sigma/(\rho' U^2 L) < 3 \cdot 10^{-3}$. В работах [4, 5] представлены опытные данные по величине критического теплового потока в стекающих пленках воды, фреонов R-11, R-13 и этилового спирта на длинных трубках при изменении параметра $\sigma/(\rho' U^2 L)$ в диапазоне малых значений ($< 2 \cdot 10^{-3}$).

Как следует из [6], исследования кризисных явлений при кипении насыщенной жидкости в режимах как волнообразования, так и развитого волнового течения на ограниченных по длине тепловыделяющих поверхностях немногочисленны. Развитие кризисных явлений при кипении, возможность использования расчетных зависимостей (1), (2) при изменении определяющего параметра $\sigma/(\rho' U^2 L)$ в диапазоне более высоких значений ($> 3 \cdot 10^{-3}$) практически не исследованы.

Исследования теплообмена, переходных и кризисных явлений при пленочном течении криогенных жидкостей по вертикальной поверхности, за исключением работ авторов [7, 8], отсутствуют. Как показывает анализ литературы, вопрос о влиянии теплофизических свойств и толщины теплопередающей стенки на условия возникновения сухих пятен и развитие кризиса при пленочном течении жидкости практически не исследован.

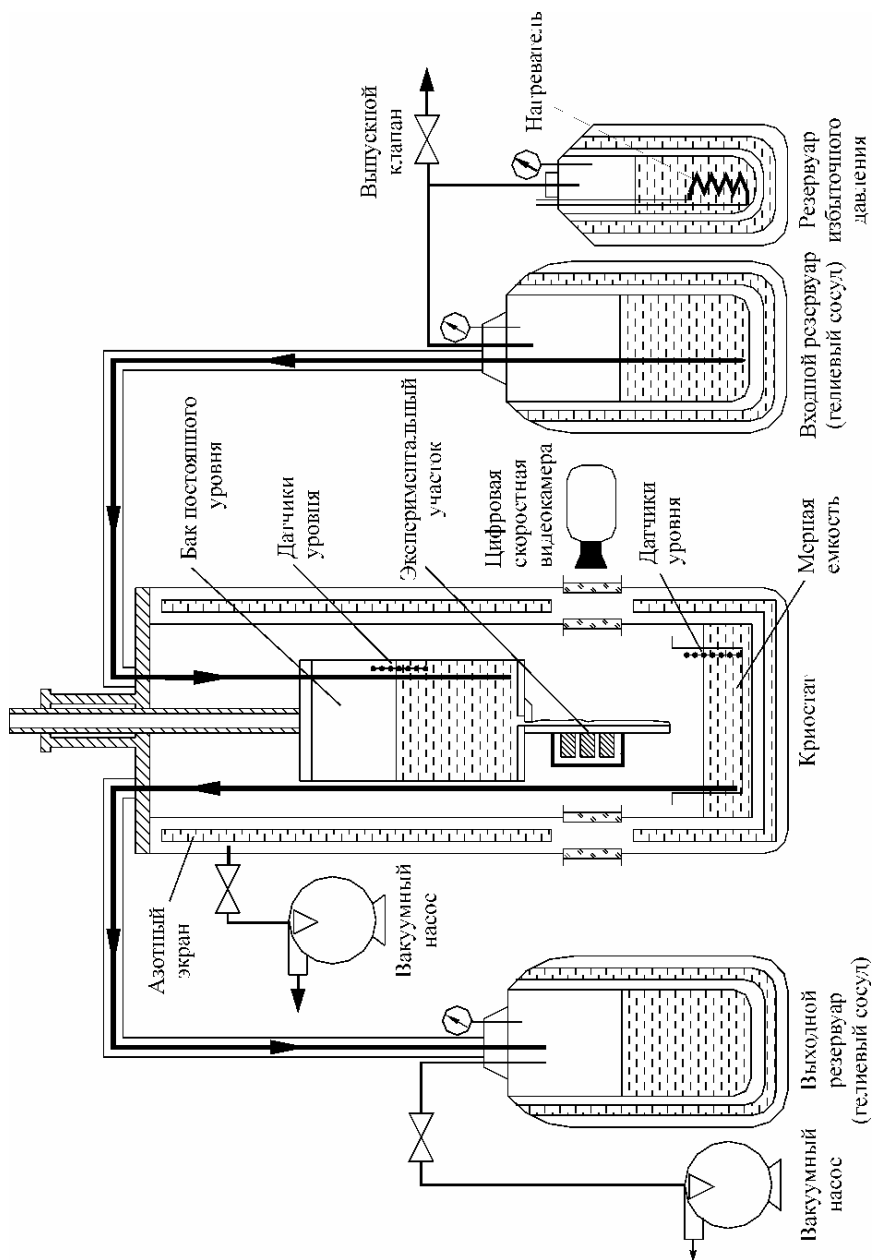


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Установка представляет собой цилиндрический адиабатический изолированный криогенный сосуд, внутрь которого помещается экспериментальная секция. Детальная схема экспериментального участка представлена на рис. 2. Обогреваемая часть экспериментального участка располагается внутри криостата, напротив оптических окон, через которые осуществляется визуализация течения. В верхней части криостата располагается бак постоянного уровня жидкости, в днище которого расположена щель пленкоформователя, через которую жидкость равномерно подается на экспериментальный участок. Размер распределительной щели в экспериментах варьируется в диапазоне от 40 до 80 мкм. В баке постоянного уровня располагается линейка с семью датчиками, которая позволяет осуществлять контроль высоты столба жидкости с ошибкой не более 2 мм. В бак постоянного уровня жидкость поступает через криогенный трубопровод из внешнего резервуара. Постоянство расхода жидкого азота обеспечивается заданным избыточным давлением во внутренней полости криогенного наполнительного сосуда емкостью $0,1 \text{ м}^3$, которое определяется испарением азота в резервуаре объемом $0,04 \text{ м}^3$.

Контроль избыточного давления в сосуде осуществляется с помощью калиброванного дифференциального датчика давления с температурной компенсацией MPX5100DP (производство компании Motorola). Давление в сосуде поддерживается с помощью резистивного нагревателя. Расход жидкости подбирается таким образом, чтобы высота столба оставалась неизменной в рамках каждой серии измерений. Он измеряется объемным методом по показаниям датчиков уровня, путем измерения скорости заполнения мерного сосуда, расположенного в нижней части криостата.

В рамках данного исследования использовался экспериментальный участок с секционной конструкцией обогреваемой части, который позволяет изменять в опытах длину зоны тепловыделения вдоль течения пленки жидкости. Его схема изображена на рис. 2. Заподлицо к дюралюминиевой пластине толщиной девять мм, шириной 75 мм и длиной 193 мм смонтированы три медных прямоугольных проводника тепла высотой 30 мм с резистивными нагревателями, равномерно установленными в торцевой части. Марка дюралюминия, использованного для изготовления пластины, Д-16. Поверхность пластины шлифовалась абразивной пастой с размером частиц около 5 мкм. Средний размер шероховатостей поверхности пластины 2–3 мкм. Длина вдоль течения каждой тепловыделяющей секции составляет 20 мм. Секции разделены между собой теплоизолирующими канавками глубиной 8 мм и шириной 2 мм, выфрезерованными в дюралюминиевой пластине для уменьшения перетоков тепла по пластине. Благодаря этим канавкам перетоки тепла между секциями в стационарных режимах, при которых часть обогреваемой поверхности не смачивается, составляют не более 2–3 % от мощности, выделяемой на нагревателях. Каждая из трех нагревательных секций имеет независимое питание, и может включаться либо по отдельности, либо совместно с другими. Таким образом, конструкция экспериментального участка позволяет получать длины области равномерного тепловыделения вдоль течения 20, 42 и 64 мм. Весь блок нагревателей закрыт теплоизолирующим текстолитовым кожухом, заполненным пенопластом с общей толщиной изоляции 10 мм. Для определения температуры теплоотдающей поверхности в дюралюминиевой пластине установлены девять калиброванных медьконстантановых дифференциальных термопар с диаметром электродов 0,25 мм. Нулевые спаи термопар помещались в насыщенный жидкий азот. Термопары электрически изолировались и плотно прижимались дюралюминиевыми вставками в пазы шириной 0,5 мм на глубине 2, 5 и 8,5 мм относительно

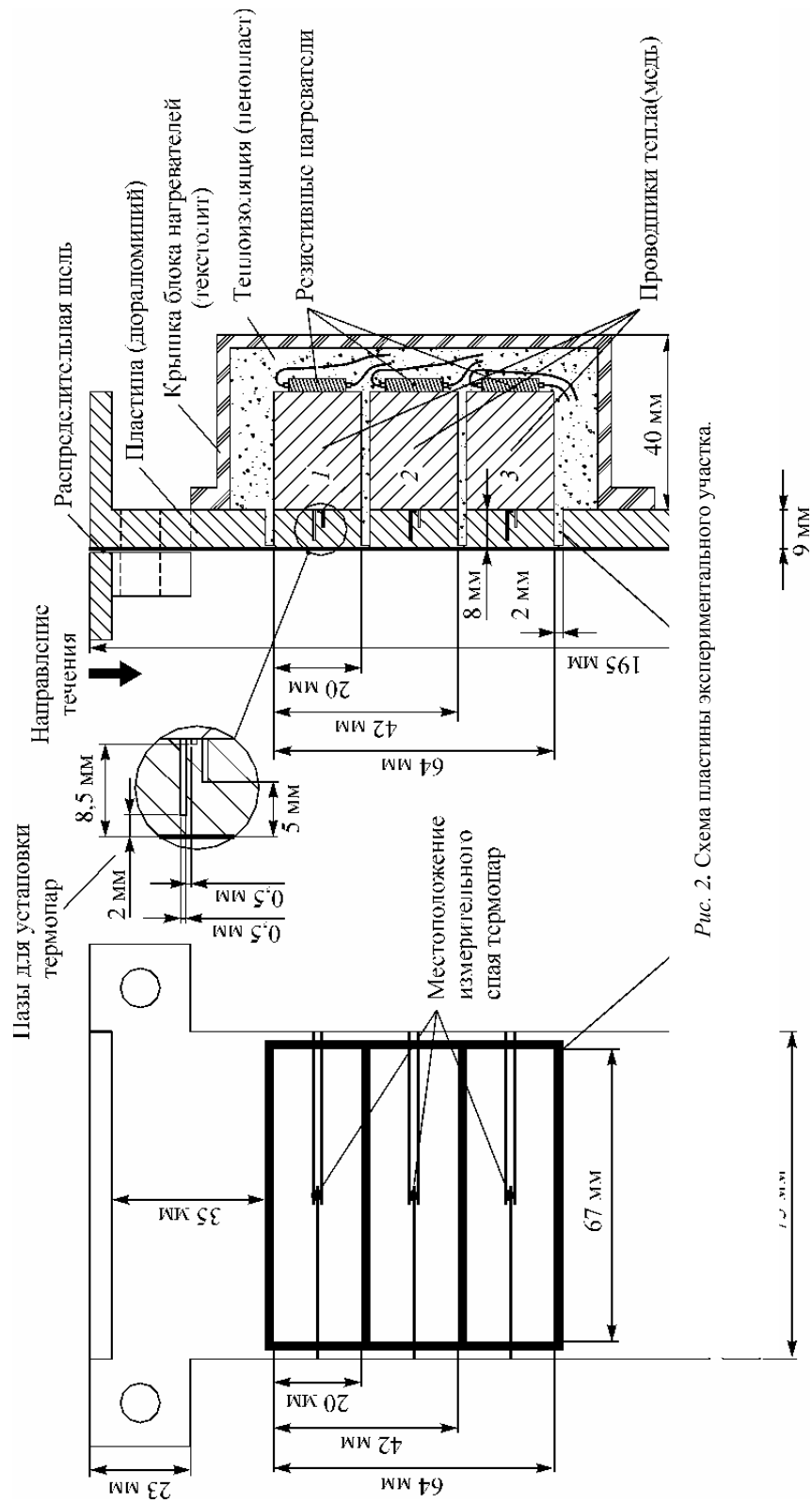


Рис. 2. Схема пластины экспериментального участка.

поверхности теплопередающей стенки и использовались для экстраполяционного определения средней температуры тепловыделяющей поверхности каждой из верхней, средней и нижней обогреваемых секций. Измерения температуры теплопередающей стенки производились при пошаговом увеличении выделяемой мощности и ожидании достижения сигналами термопар, установленных в пластине, стационарных значений. С целью увеличения точности измерений сигналы термопар предварительно усиливались с помощью дифференциальных прецизионных инструментальных усилителей Burr Brown INA114 с коэффициентом усиления, равным 1050. Плотность теплового потока определялась путем измерения подводимой мощности и корректировалась на тепловые потери. Поправочный коэффициент определялся из численного расчета тепловых потерь на единицу длины масштабной модели нагревателя с учетом условий теплоотдачи, которые реализуются в стационарных докризисных режимах. Расчетный уровень потерь составил от 8 до 12 %. Таким образом, во всех вычислениях экспериментальных величин использовался поправочный коэффициент для плотности теплового потока 0,9. В условиях, когда на поверхности теплоотдачи возникают стационарные сухие пятна, но суммарная теплоотдача остается все еще высокой, авторы используют условное соотношение для определения плотности теплового потока при описании кризисных явлений при кипении, относя тепловой поток к суммарной площади обогреваемой поверхности.

Ввод сигналов в персональный компьютер осуществлялся с помощью 16-канальной 14-разрядной платы АЦП L-761 с максимальной частотой дискретизации 125 кГц. Сбор, предварительная обработка и хранение экспериментальных данных осуществлялись с помощью разработанной специально для данного исследования компьютерной программы, снабженной графическим пользовательским интерфейсом. Относительная погрешность определения разности между температурами теплоотдающей поверхности и насыщения составляла не более 20 %, коэффициента теплоотдачи — не более 25 %. Визуализация процесса осуществлялась с помощью высокоскоростной цифровой монохромной видеокамеры Phantom v7.0, позволяющей производить видеосъемку со скоростью 4800 кадров в секунду при разрешении 800×600 пикселей и разрядностью 12 бит. Высокое временное разрешение камеры давало возможность детального исследования особенностей структуры двухфазного слоя в окрестности границы смены режимов теплоотдачи.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились с использованием жидкого азота, подаваемого на экспериментальный участок на линии насыщения при атмосферном давлении. Некоторые наиболее типичные серии измерений сопровождалась одновременной высокоскоростной видеосъемкой для того, чтобы проследить развитие процесса кипения до достижения критического теплового потока, а также исследовать динамику процесса осушения теплоотдающей поверхности при достижении кризисных условий. На рис. 3 представлены типичные зависимости среднего коэффициента теплоотдачи вдоль течения от плотности теплового потока для нагревателей длиной 20, 42 и 64 мм соответственно. На рис. 3, *a* приведены данные по коэффициенту теплоотдачи на верхнем нагревателе, на рис. 3, *b* — для одновременного тепловыделения на верхнем и среднем нагревателях, на рис. 3, *c* — для совместного нагрева на верхнем, среднем и нижнем нагревателях. В случае составных нагревателей соблюдалось равенство выделяемых мощностей на каждой из обогреваемых секций. Как видно из рисунков величина коэффициента теплоотдачи возрастает с ростом теплового потока вплоть до некоторого значения, при котором, как показывает визуализация, на поверхности нагревателя возникают стационарные

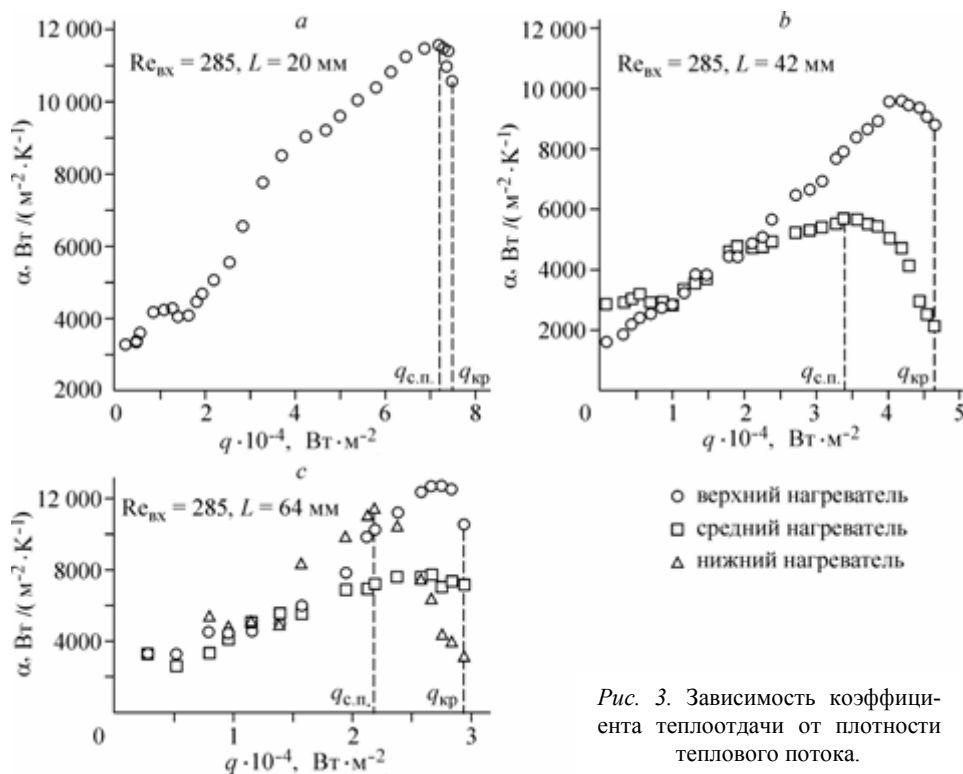
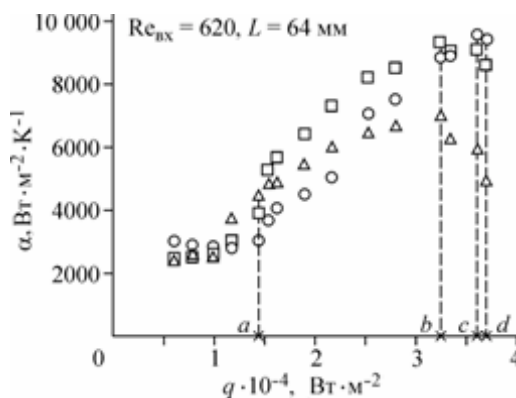


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока.

сухие пятна. Несмотря на качественное сходство кривых теплоотдачи для разных длин нагревателей, зависимость коэффициента теплоотдачи для нагревателя длиной 20 мм (короткого) заметно отличается от аналогичных зависимостей на длинных нагревателях. На коротких нагревателях тепловой поток, соответствующий возникновению стационарных сухих пятен, примерно на 4–6 % отличается от критического теплового потока, соответствующего полному осушению теплоотдающей поверхности. В случае более длинных нагревателей эта величина отличается от критического теплового потока в среднем на 20 %. Визуальные наблюдения и высокоскоростная видеосъемка показывают, что в случае опытов на коротких нагревателях осушение теплоотдающей поверхности при достижении критического теплового потока реализуется отторжением всей жидкости на входе в нагреваемую область. В опытах с нагревателями длиной 42 и 64 мм (длинными) сухие пятна, возникшие в нижней части течения, достигают критического размера при критической плотности теплового потока, формируя фронт осушения, который, распространяясь вверх по потоку, приводит к осушению теплоотдающей поверхности. На рис. 4 представлена зависимость среднего коэффициента теплоотдачи вдоль течения пленки жид-

Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока.

Условные обозначения см. на рис. 3.



кости по протяженной обогреваемой поверхности от плотности теплового потока при более высоком значении числа Рейнольдса на входе $Re_{вх} = 620$. На рис. 5 приведены соответствующие фрагменты скоростной видеосъемки, проводившейся одновременно с данными измерениями для характерных режимов развития теплообмена. Из рисунков можно видеть, что наиболее сильное снижение интенсивности теплообмена наблюдается на нижней секции тепловыделяющей поверхности. В предкризисной области тепловых потоков в верхней части нагревателя формируется режим упорядоченных структур с регулярными кипящими струями и крупномасштабными несмоченными зонами между ними.

В зависимости от длины обогреваемой поверхности часть близлежащих струй жидкости может объединяться (это характерно для наиболее длинных вдоль течения тепловыделяющих поверхностей), что приводит к увеличению поперечного размера сухих пятен. При достижении критического теплового потока, соответствующего кризису осушения, развивается переходный процесс при постоянной тепловой нагрузке. При этом происходит стремительное отделение струй жидкости от тепловыделяющей поверхности, укрупнение сухих пятен в нижней части течения (рис. 6). Затем формируется фронт осушения, который распространяется вверх по потоку, полностью вытесняя зону высокоэффективного пузырькового кипения (рис. 7). Температурные измерения, соответствующие распространению фронта осушения представлены на рис. 8. Оценки средней скорости распространения фронта осушения на основании видеосъемки и прямых измерений температуры поверхности теплопередающей стенки дают значения около 0,1 мм/с.

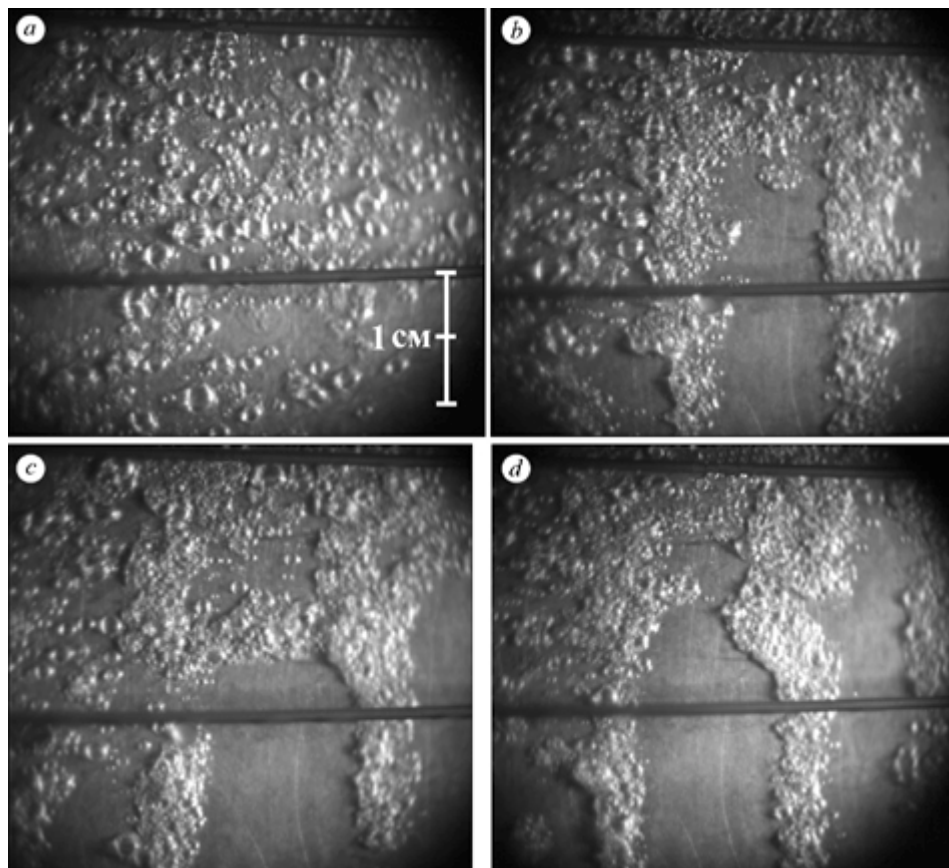


Рис. 5. Стадии развития кипения в докризисных режимах теплоотдачи.
 $Re_{вх} = 620, L = 64$ мм, $q/q_{кр} = 0,39$ (a), 0,86 (b), 0,96 (c), 0,99 (d).

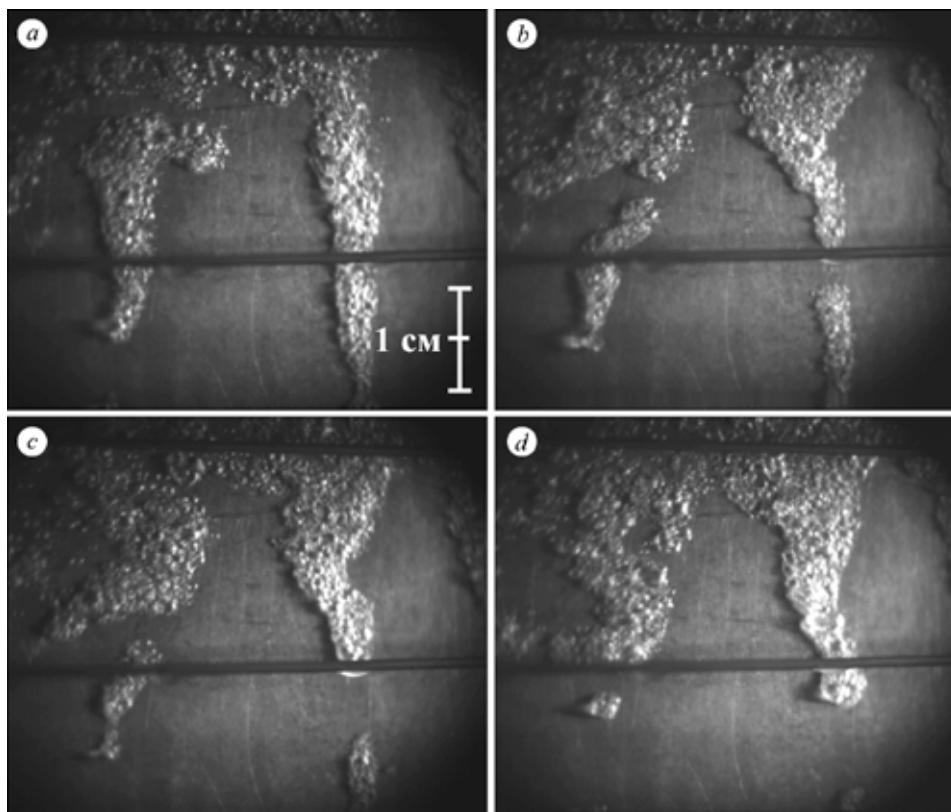


Рис. 6. Слияние сухих пятен при достижении критической плотности теплового потока.

$Re_{вх} = 620, L = 64 \text{ mm}, q/q_{кр} = 1; t, \text{ с: } 0 \text{ (a), } 0,04 \text{ (b), } 0,06 \text{ (c), } 0,09 \text{ (d)}$.

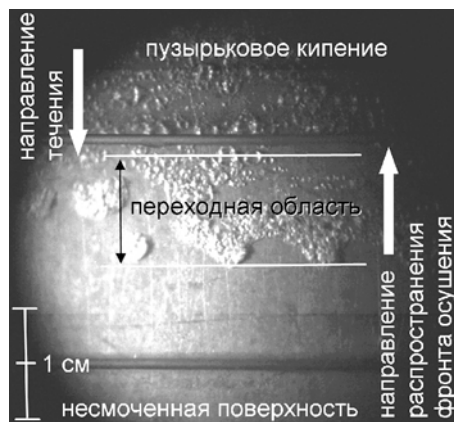
На рис. 9 показано влияние числа Рейнольдса на величину критического теплового потока для тепловыделяющих поверхностей различной длины вдоль течения. Из анализа этих данных следует, что с увеличением длины обогреваемой поверхности величина $q_{кр}$ существенно уменьшается. При этом для использованных в работе длинных нагревателей критическая плотность теплового потока практически не зависит от длины в области I, находясь при этом заметно ниже линий теплового баланса, вычисленных для соответствующих длин тепловыделяющих поверхностей.

Представление экспериментальных данных в безразмерных координатах на рис. 10 показывает, что результаты опытов практически во всех экспериментах для односекционного нагревателя длиной 20 мм при малых значениях параметра $\sigma/(\rho'U^2L)$ удовлетворительно согласуются с зависимостью (2) и с соотношением

$$\frac{q_{кр}}{\rho''rU} = 0,036 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{2/3} \left(\frac{\sigma}{\rho'U^2L} \right)^{0,15},$$

Рис. 7. Распространяющийся фронт осушения.

$Re_{вх} = 470, L = 64 \text{ mm}, q/q_{кр} = 1$.



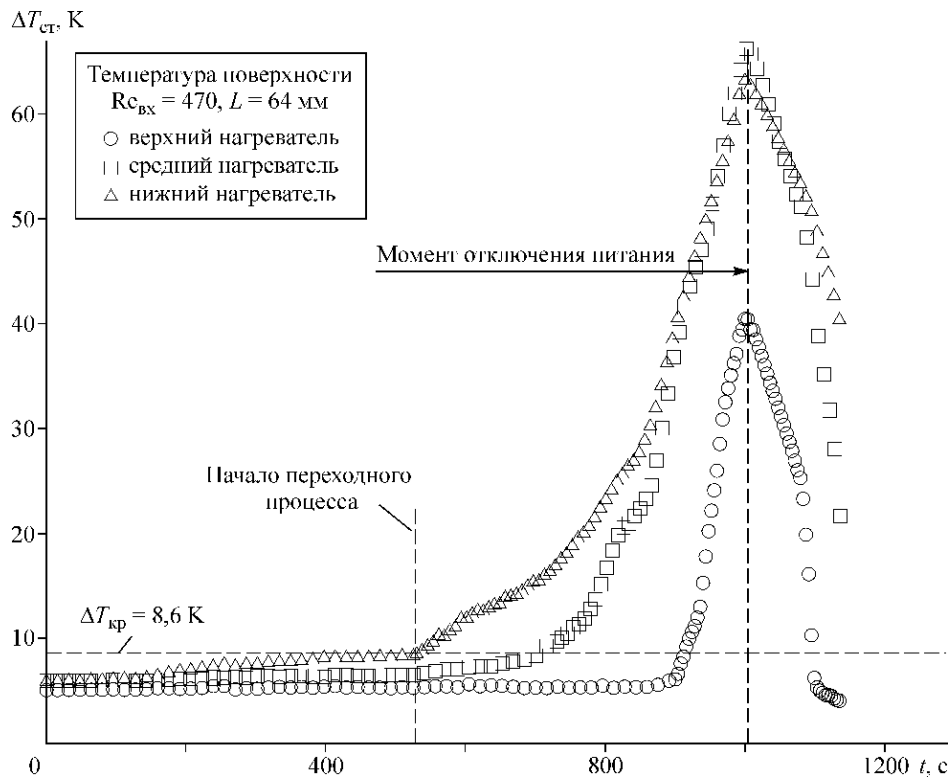


Рис. 8. Зависимость средней температуры поверхности от времени при развитии кризиса осушения.
 $q/q_{кр} = 1$.

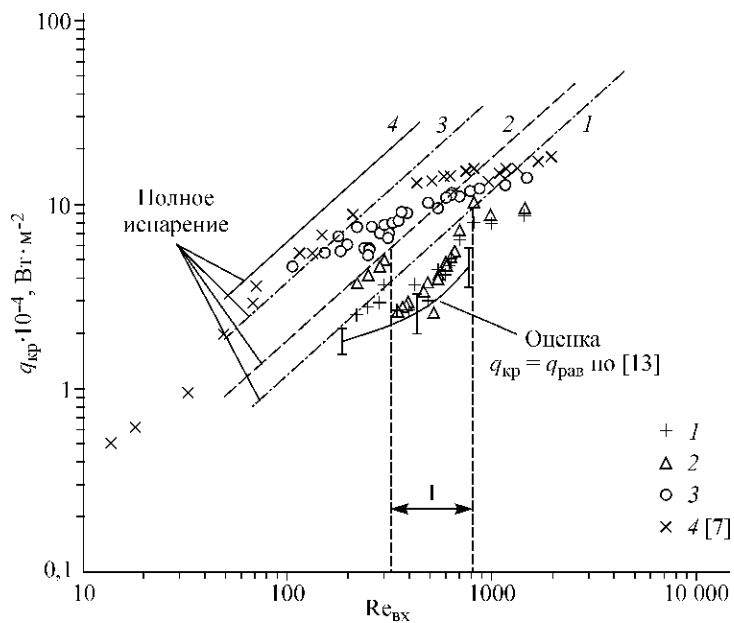


Рис. 9. Зависимость критической плотности теплового потока от числа Рейнольдса на входе.
 $L, мм: 64 (1), 42 (2), 20 (3), 12 (4)$.

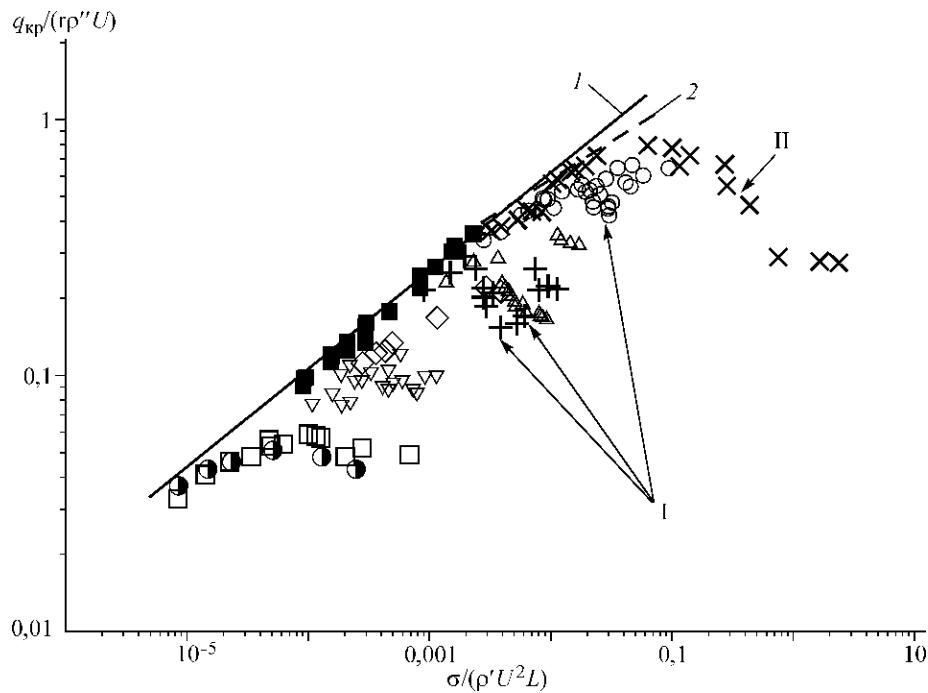


Рис. 10. Сравнение экспериментальных данных с расчетными зависимостями.

I — кризис осушения в условиях кипения при достижении порога тепловой устойчивости сухих пятен;
 II — кризис осушения в условиях испарения жидкости.

Точки	Длина, мм	Жидкость	Литературная ссылка
o	20	Азот	Настоящая работа
+	42	>>	>>
Δ	64	>>	>>
×	12	Азот	[7]
☙	12,7	FC-72	[9]
⊗	2100	Этанол	[4]
◇	390	Вода	[4]
●	180	R-11	[5]
□	180	R-113	[5]

которое было использовано ранее в работе [7] при обобщении для коротких (вдоль течения) тепловыделяющих поверхностей. С увеличением параметра $\sigma/(\rho'U^2L)$ происходит существенное уменьшение величины критического теплового потока от расчетной зависимости (2), полученной в рамках гидродинамической модели. При этом видно, что чем больше длина теплоотдающей поверхности вдоль течения, тем при меньшем значении безразмерного параметра $\sigma/(\rho'U^2L)$ происходит отклонение от расчетной зависимости практически во всей исследованной области данного параметра. Опытные данные для двух- и трехсекционных нагревателей лежат существенно ниже расчетных зависимостей. При этом наблюдается иной характер зависимости безразмерного критического теплового потока от обобщающего параметра $\sigma/(\rho'U^2L)$.

Сравнение результатов высокоскоростной визуализации для нагревателей различной длины показывает, что на коротких и более протяженных вдоль течения тепловыделяющих поверхностях развитие кризиса осушения существенно различно. На длинных нагревателях непосредственно перед достижением критического теплового потока на значительной (верхней) части теплоотдающей поверхности

крупномасштабные несмоченные зоны отсутствуют. В предкризисном режиме в нижней части (вдоль течения) теплоотдающей поверхности в результате слияния части струй происходит укрупнение сухих пятен. При достижении критического теплового потока в нижней части нагревателя, как было показано, имеется большой перегрев теплоотдающей поверхности относительно расположенных выше областей течения и формируется критическое температурное возмущение, вызывающее развитие автоволнового процесса вытеснения смоченных зон с кипением жидкости. Дальнейшее самоподдерживающееся распространение фронта осушения связано с перемещением температурного возмущения вверх по потоку. Условия реализации автоволновых процессов в различных неравновесных системах с активной нелинейностью были рассмотрены в [10]. Исследованию подобных динамических режимов в системах кипящая жидкость — тепловыделяющая поверхность посвящен ряд работ, в том числе [11–15]. В них показано, что при теплообмене в условиях большого объема жидкости область пузырькового кипения в режиме автоволнового перехода может вытесняться зоной пленочного кипения при тепловых нагрузках значительно ниже первого критического теплового потока, но выше так называемого равновесного теплового потока. Для возникновения таких переходов в условиях стационарного кипения при свободной конвекции необходимо создание, как правило, внешних локальных температурных возмущений на теплоотдающей поверхности, не связанных с внутренней природой пузырькового режима кипения. В стекающих пленках жидкости, как было показано выше, критические температурные возмущения появляются из-за возникновения крупномасштабных стационарных сухих пятен в нижней части теплоотдающей поверхности. Таким образом, при пленочном течении жидкости возникновение и развитие кризиса кипения может быть связано с потерей устойчивости квазистационарного температурного поля в теплопередающей стенке. Реализация данной разновидности кризиса будет приводить к существенному снижению величины критического теплового потока относительно расчета по гидродинамическим моделям, что необходимо учитывать в инженерной практике.

Результаты численного моделирования, проведенного в [13–15], показали, что величина равновесной плотности теплового потока $q_{\text{рав}}$ при кипении в условиях свободной конвекции существенно уменьшается с ростом начального размера локальных очагов пленочного кипения. В условиях пленочного течения жидкости крупномасштабные сухие пятна являются аналогами очагов пленочного кипения. Как следует из анализа видеосъемки, проведенной в данном исследовании, поперечный размер сухих пятен в предкризисных режимах становится большим с уменьшением степени орошения и увеличением продольной длины обогреваемой поверхности. Это связано с утончением кипящих струй, возрастанием вероятности их слияния вдоль течения, полным испарением жидкости в отдельных струях при неравномерном распределении локального расхода жидкости в них. Простейшая оценка величины критического теплового потока при кипении в пленке, основанная на расчете порога тепловой устойчивости границы смены режимов теплообмена, может быть получена по соотношению [12]:

$$q_{\text{кр}} = q_{\text{рав}} = \sqrt{\tilde{\alpha}_{\text{пуз.кип}} \tilde{\alpha}_{\text{с.п}}} \Delta T_{\text{кр}}.$$

Данное выражение получено в рамках двухзонной модели кривой теплообмена для полубесконечных смоченной и несмоченной зон в приближении тонкой теплопередающей стенки ($Bi \ll 1$).

Для пленочного течения жидкого азота при $\tilde{\alpha}_{\text{пуз.кип}} \sim 1,5 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\tilde{\alpha}_{\text{с.п}} \sim 10^2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\Delta T_{\text{кр}} \sim 10 \text{ К}$ оценка дает $q_{\text{кр}} \sim 1,2 \cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Соответствующие

оценки, учитывающие локальность сухих пятен и полученные с использованием расчетной методики [13], дают в исследованном диапазоне степени орошения $\Gamma_{\text{вх}}$ значения $q_{\text{кр}} = q_{\text{рав}}$ от $3 \cdot 10^4$ Вт/м² до $9 \cdot 10^4$ Вт/м². При проведении оценок использовались величины начального размера сухих пятен при достижении критического теплового потока, полученные высокоскоростной видеосъемкой. Представленные выше оценки качественно согласуются с опытными данными для критического теплового потока на протяженных тепловыделяющих поверхностях, полученными в данном исследовании (см. сравнение расчета и экспериментальных данных на рис. 9). На рис. 11 представлена диаграмма зависимости критического теплового потока от длины обогреваемой поверхности при различных характерных степенях орошения на входе. Из рис. 11 видно, что для относительно больших чисел Рейнольдса ($Re_{\text{вх}} = 820$) все экспериментальные точки находятся в удовлетворительном согласовании с расчетом по формуле (2). Из графика для указанного значения числа Рейнольдса видно, что гидродинамическая модель описания критического теплового потока работает вплоть до пересечения с линией, соответствующей условию полного испарения жидкости на нижнем крае теплоотдающей поверхности (расчет по тепловому балансу: $q_{\text{кр}} = \Gamma_{\text{вх}} \rho' r / L$). Для $Re_{\text{вх}} = 500$ экспериментальные точки начинают значительно отклоняться вниз от расчетной зависимости (2) уже при короткой длине нагревателя, а на наиболее протяженных обогреваемых поверхностях критический тепловой поток перестает зависеть от длины. При этом экспериментальные точки лежат существенно ниже линии теплового баланса. В этой области переход к кризису осушения теплоотдающей поверхности реализуется самоподдерживающимся распространением критического температурного возмущения, возникающего в нижней части течения из-за слияния сухих пятен. Так же как и в описанном случае, при определенной длине нагревателя осушение поверхности будет определяться полным испарением жидкости. Для числа $Re_{\text{вх}} = 220$ экспериментальные точки для длинных нагревателей оказываются на линии теплового баланса, а для более коротких — лежат ниже и линии теплового баланса и кривой, соответствующей гидродинамической модели критического теплового потока. Эти экспериментальные точки также соответствуют режиму распространения температурного возмущения вверх по потоку при достижении порога тепловой устойчивости сухих пятен.

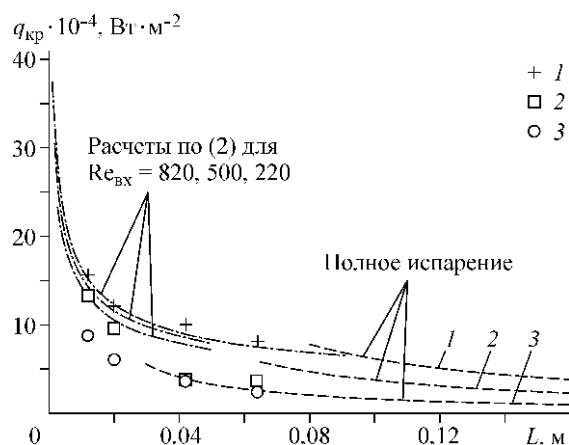


Рис. 11. Зависимость критической плотности теплового потока от длины обогреваемой поверхности.

$Re_{\text{вх}} = 820$ (1), 500 (2), 220 (3).

Таким образом, сравнение полученных опытных данных с расчетными зависимостями демонстрирует три возможных механизма развития кризисных явлений в стекающих пленках, обусловленных гидродинамическим кризисом, достижением порога тепловой устойчивости сухих пятен и полным испарением жидкости с теплоотдающей поверхности. При этом явление самоподдерживающегося распространения фронта осушения может либо иметь место при определенном сочетании определяющих параметров процесса в зависимости от степени орошения на входе, длины обогреваемой поверхности, толщины и теплофизических свойств теплоотдающей стенки, либо полностью отсутствовать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые опытные данные по интенсивности теплообмена вдоль течения, критическому тепловому потоку, динамическим характеристикам развития кризисных явлений при кипении в стекающих пленках жидкости. В работе на основе систематических экспериментальных исследований показан принципиально различный характер развития кризисных явлений при кипении в стекающих пленках жидкости, обнаружена разновидность кризиса, развитие которого обусловлено достижением порога тепловой устойчивости сухих пятен и распространением температурного возмущения в теплопередающей стенке вверх по потоку. Показано, что в условиях развития описанного типа кризиса теплоотдачи критический тепловой поток может быть существенно ниже расчета по известным гидродинамическим моделям его описания. Результаты исследования указывают на существенное влияние продольной теплопроводности в теплопередающей стенке на величину критического теплового потока и динамические характеристики процесса осушения поверхности, не учитываемое ранее в известных подходах к описанию кризисных явлений при кипении в стекающих пленках жидкости. Варьирование теплофизических свойств и толщины тепловыделяющей стенки в последующих экспериментах позволит детально исследовать локальный теплообмен, условия возникновения и развития сухих пятен при значительных температурных градиентах на теплоотдающей поверхности.

Полученные результаты важны для разработки новых подходов к описанию переходных и кризисных процессов и явлений при кипении в стекающих пленках жидкости с учетом влияния геометрических параметров и теплофизических свойств теплопередающей стенки. Практическое значение работы определяется важностью полученных результатов для количественного определения границ оптимальных и аварийных режимов работы различных типов теплообменников с высокой теплонапряженностью.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

L — длина обогреваемой поверхности в направлении течения, мм;	$\tilde{\alpha}_{\text{пуз. кип}}$, $\tilde{\alpha}_{\text{с.п}}$ — линеаризованные коэффициенты теплоотдачи в зонах пузырькового кипения и сухих пятен соответственно, Вт/(м ² ·К);
q — плотность теплового потока, Вт/м ² ;	δ — толщина, м;
r — скрытая теплота парообразования, Дж/кг;	Γ — степень орошения, м ² /с;
$Bi = \alpha \delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}}$ — число Био;	λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
$Re = 4\Gamma / \nu$ — пленочное число Рейнольдса;	ν — кинематическая вязкость, м ² /с;
t — время, с;	ρ — плотность, кг/м ³ ;
$\Delta T = T - T_{\text{нас}}$ — температурный напор, К;	σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;
U — средняя скорость жидкости в пленке, м/с;	
$\alpha = q / \Delta T$ — средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К);	

ИНДЕКСЫ

' — жидкость;

" — пар;

вх — на входе;

кр — критический;

нас — линия насыщения;

с.п — сухие пятна;

ст — стенка;

рав — равновесная плотность теплового потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Baines R.P., Masri A.El., Rohsenow M.W.** Critical heat in flowing liquid films // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1984. — Vol. 27, № 9. — P. 1623–1629.
2. **Katto, Y., Ishii K.** Burnout in a high heat flux boiling systems with a forced supply of liquid through a plane jet // Proc. 6th Intern. Heat Transfer Conf. — Toronto, 1978. — P. 435–440.
3. **Mudawar, I.A., Incropera T.A., Incropera F.P.** Boiling heat transfer and critical heat flux in liquid films in falling on vertically-mounted heat sources // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1987, Vol. 30. — P. 2083–2095.
4. **Дорохов А.Р.** Тепло- и массоперенос в элементах абсорбирующих бромисто-литиевых холодильных машин: дисс. д. техн. наук. — Новосибирск, 1992. — 281 с.
5. **Tatsuhiko Ueda, Mitsuru Inoue, Seichi Nagatome.** Critical heat flux and droplet entrainment rate in boiling of falling liquid films // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1981, 24. — P. 1257–1266.
6. **Pavlenko A.N., Lel V.V.** Heat Transfer and crisis phenomena in falling films of criogenic liquid // Russ. J. Engng. Thermophys. — 1997. — Vol. 7, No. 3–4. — P. 177–210.
7. **Handbook of Phase Change: Boiling and Condensation / Ed. in chief S.C. Kandlikar.** — London: Taylor and Francis, 1999. — 728 p.
8. **Pavlenko A.N., Lel V.V.** Heat transfer and crisis phenomena in falling films of criogenic liquid // Russ. J. Engng. Thermophys. — 1997. — Vol. 7, No. 3–4. — P. 177–210.
9. **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. Engng. Thermophys. — 2002. — Vol. 11, No. 1. — P. 7–43.
10. **Mudawar I., Maddox D.E.** Critical Heat flux in subcooled flow of fluorocarbon liquid on a simulated electronic chip in a vertical rectangular channel // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1989. — Vol. 32. — P. 379–394.
11. **Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г.** Автоволновые процессы. — М.: Наука, 1987. — 240 с.
12. **Жуков С.А., Барелко В.В., Бокова Л.Ф.** Волновые процессы на тепловыделяющих поверхностях при кипении жидкостей // Автоволновые процессы в системах с диффузией: Сборник научных трудов. — Горький: Ин-т прикл. физ. АН СССР, 1981. — С. 149–165.
13. **Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л.** Теплообмен в ядерных энергетических установках. — М.: Изд-во МЭИ, 2003. — 548 с.
14. **Павленко А.Н., Стародубцева И.П.** Исследование динамики развития полубесконечного и локального очагов пленочного кипения // Теплофизика и аэромеханика. — 1998. — Т. 5, № 2. — С. 216–228.
15. **Павленко А.Н., Стародубцева И.П.** Переходные процессы при кипении // Тепломассообмен. — ММФ. Т. 5. — Минск: ИТМО АНБ, 2000. — С. 32–41.
16. **Павленко А.Н., Стародубцева И.П., Мацех А.М.** Влияние граничных условий на динамику развития очагов пленочного кипения // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 10, № 4. — С. 611–628.

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2004 г.