

УДК 536.423.4

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ

Е. А. Чиннов, И. А. Шарина, О. А. Кабов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: chinnov@itp.nsc.ru

Экспериментально исследован теплообмен при течении диэлектрической жидкости FC-72 по вертикальной поверхности с нагревателем размером 150×150 мм в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 5 \div 375$. Построена карта режимов течения пленки жидкости, выделены характерные области теплообмена. Получены данные по зависимости температуры стенки нагревателя и локального теплового потока на оси симметрии нагревателя от продольной координаты. Рассчитаны локальные и осредненные коэффициенты теплоотдачи. Показано, что в области формирования струй в пленке жидкости при малых числах Рейнольдса происходит интенсификация теплоотдачи к пленке.

Ключевые слова: пленка жидкости, теплообмен, интенсификация, волновое течение, термокапиллярные эффекты.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению теплоотдачи к стекающей пленке жидкости определяется важностью этого процесса для технических приложений. Этой теме посвящены монографии [1–3]. Предложены обобщающие зависимости и методики расчетов [3–5], которые, как правило, дают удовлетворительный результат при относительно небольших тепловых потоках и больших числах Рейнольдса пленки. Большинство известных в литературе данных получено либо для протяженных нагревателей длиной более 300 мм [3, 4, 6], либо для очень коротких ($2,2 \div 6,5$ мм) нагревательных элементов [7–10]. Не изучено влияние возникающих на поверхности пленки трехмерных деформаций на теплообмен.

В [11] исследовано формирование струй в области двумерных и трехмерных волн при течении нагреваемой пленки жидкости по вертикальной поверхности. Показано, что помимо термокапиллярного механизма формирования струй существует термокапиллярно-волновой механизм.

В данной работе исследован теплообмен в недогретой до температуры насыщения пленке жидкости FC-72, стекающей по нагревателю размером 150×150 мм, в условиях формирования струйных течений под действием термокапиллярных сил. Так как термокапиллярные деформации определяются градиентом температуры на поверхности пленки жидкости, в экспериментах использовался специально сконструированный нагреватель, позволяющий перераспределять тепловые потоки вдоль поверхности нагрева. Проанализировано влияние формирования струйных течений на теплоотдачу к пленке жидкости FC-72.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 02-02-16478).

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Условия проведения эксперимента. Подробное описание экспериментальной установки и методик измерений приведено в [12]. Особенности работы установки и нагревателя при малых числах Рейнольдса обсуждены в [11].

Исследование теплоотдачи легкокипящей жидкости FC-72 выполнено на закрытом экране рабочем участке с установкой конденсатора в парогазовом пространстве. Начальная температура пленки и температура экрана равнялись температуре окружающего воздуха $T_0 = 20$ °С. Выполненные в [8] измерения концентрации паров рабочей жидкости показывают, что конструкция рабочего участка позволяла поддерживать вдали от пленки жидкости на уровне нагревательного элемента равновесное состояние парогазовой смеси. В отсутствие нагрева испарения пленки не происходило. Все эксперименты проводились при атмосферном давлении. С увеличением плотности теплового потока и температуры жидкости интенсивность испарения возрастала. Увеличивалась температура парогазовой смеси, а избыточный объем воздуха вытеснялся из полости рабочей камеры через тонкий капилляр, соединенный с атмосферой. Весовая концентрация и парциальное давление паров жидкости FC-72 возрастали. Расстояние (X_n) между соплом пленкоформователя и верхним краем нагревателя составляло 41,5 мм.

Режимы течения и теплообмена. Гидродинамика формирования струйных течений при нагреве стекающей пленки жидкости FC-72 описана в [11]. На рис. 1 приведена карта режимов течения пленок жидкости FC-72 по нагревателю. Средняя плотность теплового потока $\langle q \rangle$ определялась по мощности нагревателя, а число Рейнольдса пленки — по зависимости $Re = \Gamma/\mu$, где Γ — удельный расход жидкости, кг/(м·с); μ — динамическая вязкость жидкости, кг/(м·с). На рис. 2 приведены фотографии течения пленки, на которых линией 1 отмечено место выхода теплового пограничного слоя жидкости на поверхность пленки. При ламинарном режиме движения длину начального участка, оканчивающегося в точке, где прогретый слой жидкости достигает поверхности пленки, можно определить из выражения (см. [3])

$$L_b = 0,139 l_\nu Pr Re^{4/3}. \quad (1)$$

Здесь $l_\nu = (\nu^2/g)^{1/3}$; ν — кинематическая вязкость; g — ускорение свободного падения; Pr — число Прандтля. На рис. 1 выделены области течения сплошной пленки жидкости с

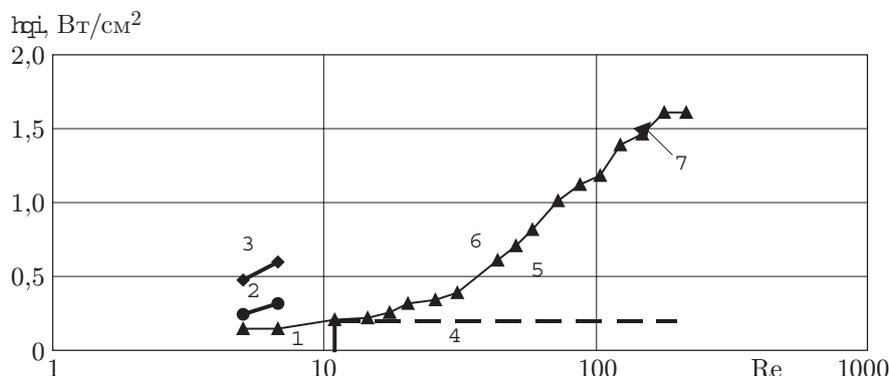


Рис. 1. Карта режимов течения пленок FC-72 по нагревателю размером 150×150 мм, $X_n = 41,5$ мм:

1 — двумерные волны на поверхности пленки; 2 — формирование устойчивых структур на части нагревателя с сухими полосами между ними; 3 — формирование однородного струйного течения по всему нагревателю с испарением струй внизу нагревателя; 4 — трехмерные синхронные волны; 5 — формирование струй; 6 — распространение сухих пятен между струями; 7 — разрыв

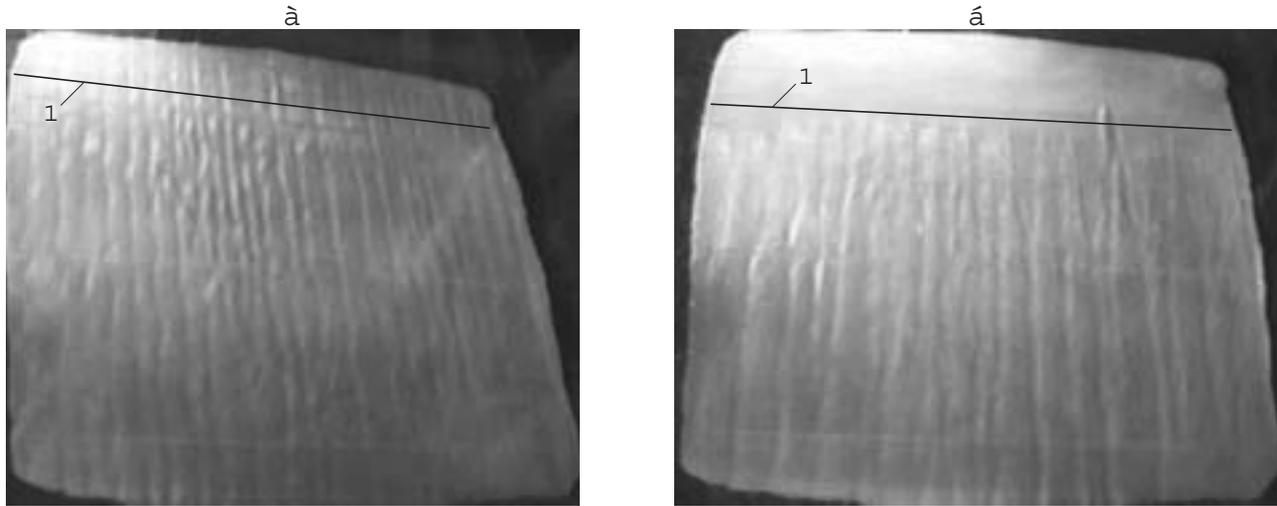


Рис. 2. Фотографии течения пленки FC-72:

a — $Re = 51$, $\langle q \rangle = 0,61$ Вт/см², $L_b = 10,2$ мм (линия 1); *б* — $Re = 113,7$, $\langle q \rangle = 1,19$ Вт/см², $L_b = 30,2$ мм (линия 1)

двумерными волнами на поверхности пленки в верхней части нагревателя и со слабовыраженной трехмерностью в средней его части (1), а также область трехмерных синхронных волн, распространяющихся с верхней части нагревателя (4). Эти режимы наблюдаются при плотности теплового потока $\langle q \rangle < 0,2$ Вт/см² и разделяются линией, соответствующей $Re = 11$. Показана область формирования струй типа Б (см. [11]) на поверхности сплошной пленки жидкости на гребнях синхронных волн (5). Струи регистрируются при $\langle q \rangle > 0,2$ Вт/см² до появления несмываемых сухих пятен (линия (7)). В области (6) развития струйных течений при распространении сухих пятен между ними выделены линии формирования устойчивых структур (2) и формирования однородного струйного течения по всему нагревателю с частичным испарением струй внизу нагревателя (3). Эти режимы для пленок жидкости FC-72 наблюдались только при малых числах Рейнольдса.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости средней плотности теплового потока $\langle q \rangle$ от перепада температур $\Delta T_0 = T_w - T_0$ при тчении пленки жидкости FC-72 по нагревателю. При $X_t = 2,25$ мм (X_t — расстояние между передней кромкой пластины нагревателя и термопарой) наблюдается излом в зависимости $\langle q \rangle$, что свидетельствует об изменении закона теплообмена с ростом плотности теплового потока. Смена механизмов теплообмена соответствует формированию регулярных структур типа А [11] с полным испарением пленки в межструйной области в зоне измерения температуры T_w на поверхности нагревателя. При $X_t \geq 20,3$ мм смена режимов теплообмена явно не проявляется. Не наблюдается существенных изменений показателя степени в зависимости $\langle q \rangle = \Delta T_0^n$ ($n = 1,2$). В этой области при возрастании тепловых потоков происходит нарушение устойчивого прямолинейного течения струй. Их движение становится зигзагообразным, что приводит к более полному орошению нагревателя. При тчении струй ($X_t = 144$ мм) значение n уменьшается ($n = 0,9$). В нижней части нагревателя происходит наиболее интенсивное испарение жидкости — вплоть до осушения части поверхности при максимальных тепловых потоках. Подобные режимы теплообмена наблюдались также при $Re = 6,9$. При больших числах Рейнольдса измерения выполнялись до появления устойчивых сухих пятен. В дальнейшем анализируется теплоотдача к сплошной пленке жидкости до ее разрыва.

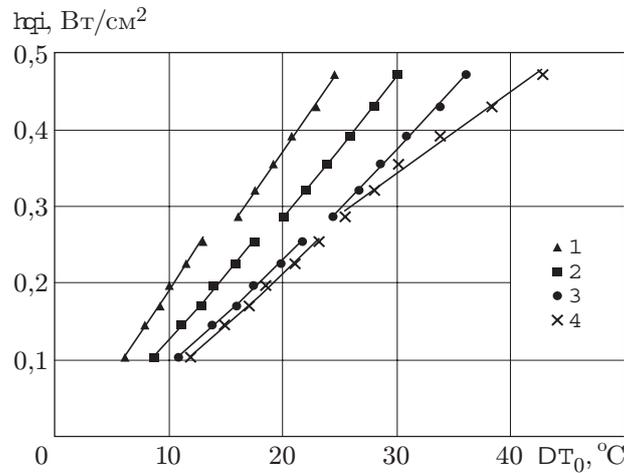


Рис. 3. Зависимости средней плотности теплового потока $\langle q \rangle$ от перепада температур ΔT_0 при $Re = 5$:

1 — $X_t = 2,25$ мм; 2 — $X_t = 20,3$ мм; 3 — $X_t = 80,2$ мм; 4 — $X_t = 143,95$ мм

Распределение температур и тепловых потоков на поверхности нагревателя. На рис. 4 показано распределение температуры и безразмерной локальной плотности теплового потока $q/\langle q \rangle$ вдоль поверхности нагревателя. Локальная плотность теплового потока q определялась по перепаду температур на стальной плите нагревателя. При $Re = 5$ и $\langle q \rangle = 0,43$ Вт/см² жидкость в нижней части нагревателя испаряется, и температура линейно возрастает с увеличением расстояния X_t . В нижней точке нагревателя температура поверхности выше температуры кипения жидкости FC-72 при нормальном давлении. При $\langle q \rangle < 0,29$ Вт/см² до разрыва пленки жидкости температура в нижней половине нагревателя почти постоянна. Как отмечалось в [11], подобное нелинейное распределение температуры объясняется перераспределением теплового потока в нагревателе, которое помимо числа Рейнольдса пленки и теплового потока зависит от теплоемкости и теплопроводности жидкости. Причем существенная неравномерность распределения плотности теплового потока вдоль нагревателя сохраняется и при больших значениях Re (рис. 4, б). При течении сплошной пленки для жидкости FC-72 в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса выполняются соотношения $0,2 < (q - \langle q \rangle) / \langle q \rangle < 1,4$ и $0,2 < (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max} < 0,5$ (T_{\max} и T_{\min} — максимальная и минимальная температуры, измеренные на поверхности нагревателя). Распределение температуры вдоль нагревателя лучше соответствует условию $T_w = \text{const}$, чем $q = \text{const}$.

2. АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕНА

В большинстве работ коэффициент теплоотдачи ($\alpha_F = q/\Delta T_F$) рассчитывался по перепаду температуры между ее значением на стенке нагревателя и среднемассовой температурой пленки $\Delta T_F = T_w - T_F$. При условии постоянства плотности теплового потока среднемассовая температура пленки определялась простым соотношением [3]. В случае, когда условие $q = \text{const}$ не выполняется (рис. 4, б), среднемассовая температура пленки вычисляется из баланса энергии

$$T_F^* = T_0 + \frac{1}{c_p \mu_0 Re_0} \int_0^{X_t} [q(x) - q_s(x)] dx, \quad (2)$$

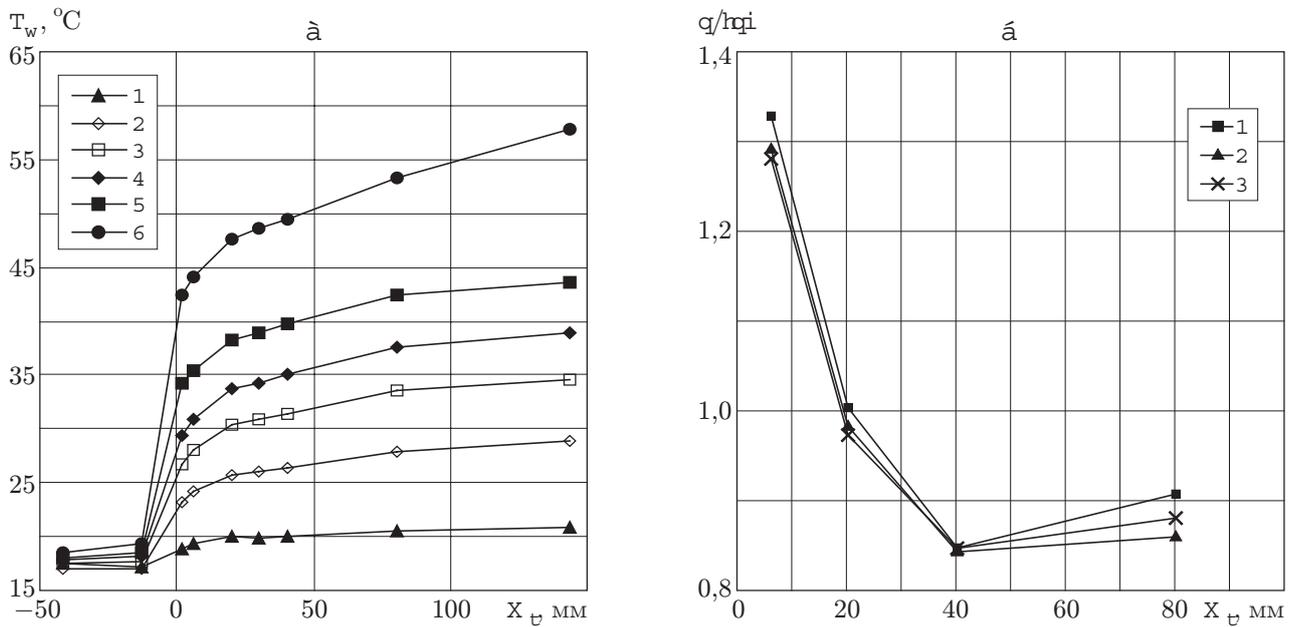


Рис. 4. Распределение температуры (а) и безразмерной плотности теплового потока (б) вдоль нагревателя:

а — $Re = 5$; $\langle q \rangle$, Вт/см²: 1 — 0,04; 2 — 0,1; 3 — 0,17; 4 — 0,22; 5 — 0,29; 6 — 0,43; б — $Re = 375,7$; $\langle q \rangle$, Вт/см²: 1 — 1,19; 2 — 1,54; 3 — 1,85

где q_s — плотность теплового потока испарения; c_p — удельная теплоемкость жидкости; μ_0 — динамическая вязкость жидкости; индекс 0 означает, что величина определена по T_0 .

Однако измерения локальной плотности теплового потока на поверхности нагревателя в четырех точках (см. рис. 4,б) не позволяют аппроксимировать зависимость $q(x)$ с достаточной точностью вдоль всей поверхности нагрева. Распределение плотности теплового потока $q_s(x)$ на поверхности пленки нам неизвестно. Поэтому для анализа экспериментальных данных были выбраны условно-локальный коэффициент теплоотдачи ($\alpha_0 = q/\Delta T$), вычисленный по локальной плотности теплового потока и перепаду температур между поверхностью нагревателя (в точке измерения) и начальной температурой пленки ($\Delta T = T_w - T_0$), и осредненный коэффициент теплоотдачи ($\langle \alpha \rangle = \langle q \rangle / \Delta T$), построенный по средней плотности теплового потока и перепаду температуры между ее значением в нижней точке измерения ($X_t = 144$ мм) на нагревателе и начальной температурой пленки.

На рис. 5 показаны зависимости числа Нуссельта ($Nu_{\delta,0} = \alpha_0 \delta_0 / \lambda_0$) от отношения $X_t / (Pe_0 \delta_0)$ (δ_0 — толщина пленки). Число Пекле $Pe_0 = Re_0 Pr_0$ рассчитывалось по расходу и физико-химическим свойствам жидкости при температуре T_0 . Представлено сравнение экспериментальных данных с расчетной зависимостью для течения плоской пленки при $T_w = \text{const}$ (см. [13]):

$$Nu_{\delta,0} = 2 \sum_{n=0}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{8}{12} \varepsilon_n^2 \frac{1}{Pe_0} \frac{X_t}{\delta_0}\right), \tag{3}$$

где $B_n = -(1/2)A_n(d\psi_n/dY)_{Y=1}$; $A_n, \varepsilon_n, \psi_n$ — постоянные и собственные значения в рассматриваемой задаче о теплообмене при $T_w = \text{const}$. При этом использовалась известная аналогия течения пленки с течением в плоском канале [3].

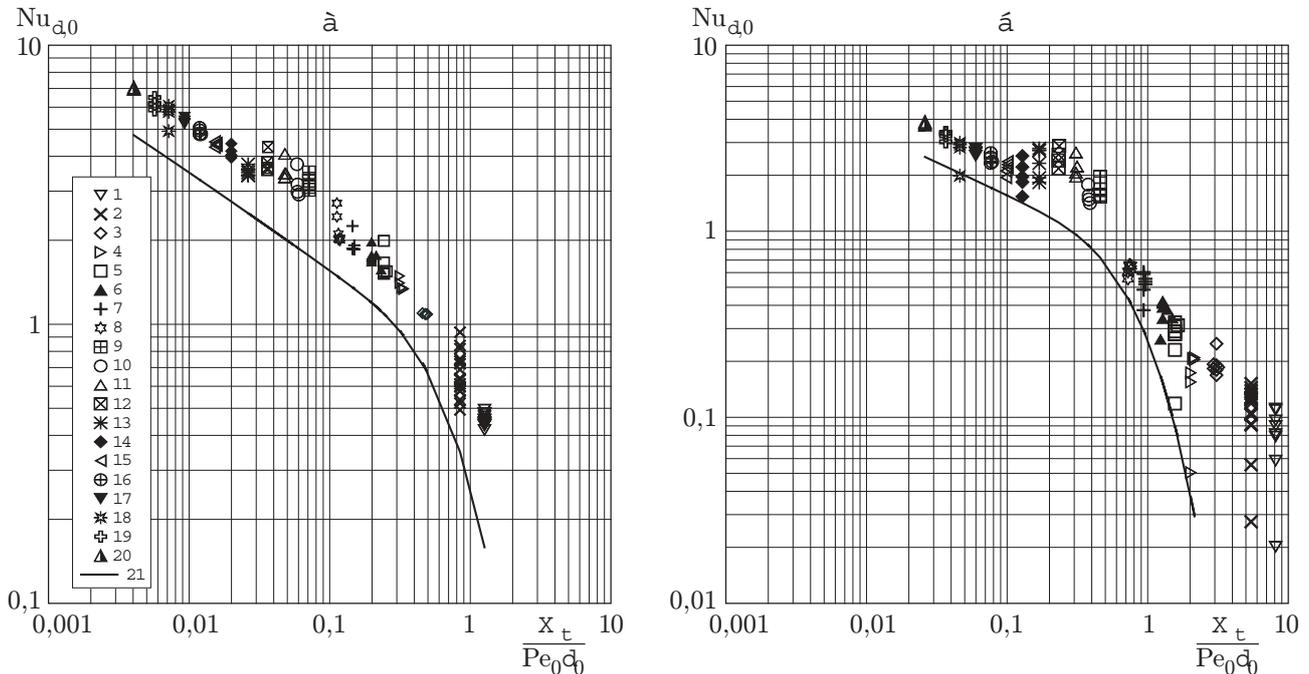


Рис. 5. Зависимости числа Нуссельта ($Nu_{\delta,0} = \alpha_0 \delta_0 / \lambda_0$) от $X_t / (Pe_0 \delta_0)$:

Re: 1 — 5; 2 — 6,85; 3 — 10,5; 4 — 14,3; 5 — 17,4; 6 — 20,3; 7 — 25,6; 8 — 31; 9 — 43,7; 10 — 51; 11 — 58,8; 12 — 72,8; 13 — 92,3; 14 — 113,7; 15 — 136,2; 16 — 167,6; 17 — 201,7; 18 — 244,9; 19 — 291,3; 20 — 375,7; 21 — зависимость (3); а — $X_t = 6,25$ мм; б — $X_t = 40,3$ мм

Из рис. 5 видно, что экспериментальные точки лежат выше линии, построенной по формуле (3). Отклонение зависит от числа Рейнольдса. Можно выделить три области. При больших числах Рейнольдса ($Re > 70$) на нагревателе в точках измерения течет гладкая пленка (см. рис. 2, б). Для всех значений X_t в этой области диапазон отклонений экспериментальных данных от линии, построенной по формуле (3), составляет 20–30 %. При $Re = 30 \div 70$ начальный участок теплообмена четко не выражен (рис. 2, а). В области нагревателя на развитых синхронных трехмерных волнах формируются струи, которые распространяются вверх. Подобный механизм формирования струй описан в работе [11]. Для всех значений X_t в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса экспериментальные точки отклоняются вверх от линии, соответствующей (3) (на 30–55 %). Возможно, процесс формирования трехмерных волн и дальнейшего их разделения на струи является механизмом интенсификации теплообмена. При малых числах Рейнольдса ($Re < 14$) на поверхности пленки наблюдаются двумерные и трехмерные волны, но деформации поверхности малы. Сильный разброс экспериментальных точек в этой области связан с влиянием изменения плотности теплового потока. При $X_t = 6,25$ мм отклонение средних значений составляет 30 % и более. При больших значениях X_t отклонение заметно увеличивается. По-видимому, это связано с ростом влияния процесса испарения в нижней части нагревателя, так как соответствует увеличению температуры пленки в зависимости от q и X_t .

На рис. 6 представлено сравнение полученных из эксперимента осредненных значений $\langle Nu \rangle = \langle \alpha \rangle \delta_0 / \lambda_0$ с теоретической зависимостью Нуссельта (см. [1])

$$\alpha_F = 0,0236 \frac{\mu c_p}{L} 4 Re_F + 2,07 \lambda \left(\frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} (4 Re_F)^{-1/3}, \quad (4)$$

где λ — теплопроводность жидкости; L — длина пластины. Осредненный коэффициент

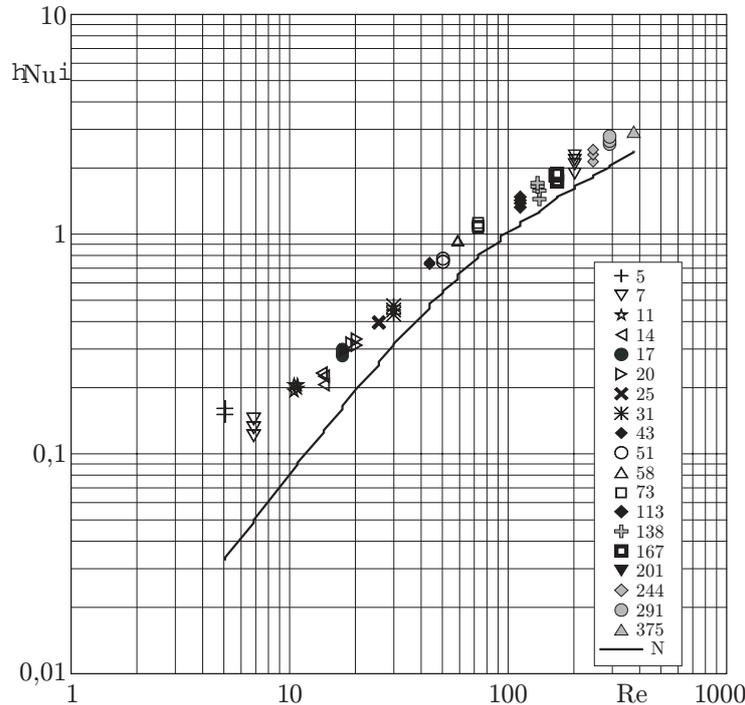


Рис. 6. Зависимости числа Нуссельта $\langle Nu \rangle = \langle \alpha \rangle \delta_0 / \lambda_0$ от числа Рейнольдса Re (указаны цифрами), N — расчет по (4), (5)

теплоотдачи рассчитывался по следующей зависимости:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\alpha_F}{1 + \alpha_F L / (\mu c_p Re_F)} \tag{5}$$

Экспериментальные данные лежат выше линии, рассчитанной по формулам (4), (5). При $Re > 20$ различие составляет 25–35 %. При $Re < 20$ расхождение с теорией увеличивается до четырех раз, что соответствует росту влияния испарения при уменьшении числа Рейнольдса.

Подведем итоги проведенного исследования. Построена карта режимов течения пленки FC-72 по нагревателю размером 150 × 150 мм. Особенностью является формирование регулярных струй под действием термокапиллярных сил при течении нагреваемой пленки жидкости в области двумерных и трехмерных волн. Выделены характерные области теплоотдачи к сплошной пленке жидкости и струйному течению. Измерены распределения температур и тепловых потоков вдоль нагревателя. Обнаружено увеличение локального коэффициента теплоотдачи в области стабилизированного теплообмена при формировании струй. Существенная интенсификация теплообмена, определяемая средним значением коэффициента теплоотдачи, наблюдается при малых числах Рейнольдса и интенсивном испарении пленки жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронцов Е. Г., Тананайко Ю. М.** Теплообмен к жидким пленкам. Киев: Техника, 1972.
2. **Ганчев Б. Г.** Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими пленками. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. **Гимбутис Г.** Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Мокс-клас, 1988.

4. **Wilke W.** Wärmeübergang an Rieselfilme // VDI-Forschungsheft H. 1962. N 490. S. 1–36.
5. **Нигматулин Б. И., Горюнова М. З., Васильев Ю. В.** К обобщению опытных данных по теплоотдаче при течении жидких пленок вдоль твердых поверхностей // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19, № 5. С. 991–1001.
6. **Fujita T., Ueda T.** Heat transfer to falling liquid films and film breakdown-I (subcooled liquid films) // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1978. V. 21. P. 97–108.
7. **Кабов О. А.** Теплоотдача от нагревателя с малым линейным размером к свободно стекающей пленке жидкости // Тр. I Рос. нац. конф. по теплообмену, Москва, 21–25 ноября 1994 г. М.: Изд-во Моск. энерг. ин-та, 1994. Т. 6. С. 90–95.
8. **Chinnov E. A., Kabov O. A., Muzykantov A. V., Zaitsev D. V.** Influence of plate inclination on heat transfer and breakdown of locally heated flowing liquid film // Intern. J. Heat Technol. 2001. V. 19, N 1. P. 31–44.
9. **Кабов О. А., Чиннов Е. А.** Теплообмен от локального источника тепла к недогретой пленке жидкости // Теплофизика высоких температур. 2001. Т. 39, № 5. С. 758–768.
10. **Kabov O. A., Scheid B., Sharina I. A., Legros J.-C.** Heat transfer and rivulet structures formation in a falling thin liquid film locally heated // Intern. J. Therm. Sciences. 2002. V. 41. P. 664–672.
11. **Чиннов Е. А., Кабов О. А.** Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 5. С. 128–137.
12. **Chinnov E. A., Kabov O. A., Marchuk I. V., Zaitsev D. V.** Effect of thermocapillary non-linear deformations on heat transfer and breakdown of falling liquid films // Proc. 12th Intern. heat transfer conference Grenoble, 18–23 Aug., 2002. Grenoble: Elsevier SAS, 2002. V. 2. P. 495–500.
13. **Петухов Б. С.** Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967.

*Поступила в редакцию 4/VI 2003 г.,
в окончательном варианте — 30/X 2003 г.*
