

ударной волны в воздухе 23 км/сек (при взрыве ТНТ начальная скорость ударной волны в воздухе ~ 7.5 км/сек). В случае определенной таким же образом энергии, выделившейся в форме взрыва на поверхности преграды при ударе сгустка по преградам из парафина и вольфрама, величина энергии составила всего 2.3 и 3.5 э ТНТ соответственно [4].

Таким образом, используя встречное столкновение масс вещества, движущихся со скоростью 24 км/сек, в лабораторных условиях получен взрыв с объемной концентрацией энергии, в 75 раз превышающей концентрацию энергии взрывчатого вещества типа ТНТ.

Авторы благодарят А. М. Калугина за помощь в проведении опытов.

Поступила 17 VI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Г о п к и н с Г. Динамические неупругие деформации металлов. М., «Мир», 1964.
2. О р л е н к о Л. П. Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. М., «Машиностроение», 1964.
3. С е д о в Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М., Гостехиздат, 1957.
4. Р у с а к о в М. М., Л е б е д е в М. А. О выделении энергии при моделировании метеоритного удара. Космические исследования, 1972, т. 10, № 1.

УДК 536.423.1 : 532.526

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ

В. И. Бараненко, Г. Ф. Смирнов

(Николаев—Одесса)

В статье приводятся результаты экспериментального исследования механизма теплообмена при кипении воды с помощью дифракционного лазерного интерферометра. Показано, что обработка интерферограмм позволяет получить локальные количественные характеристики процесса, определить масштаб температурных пульсаций в зоне действия центра парообразования.

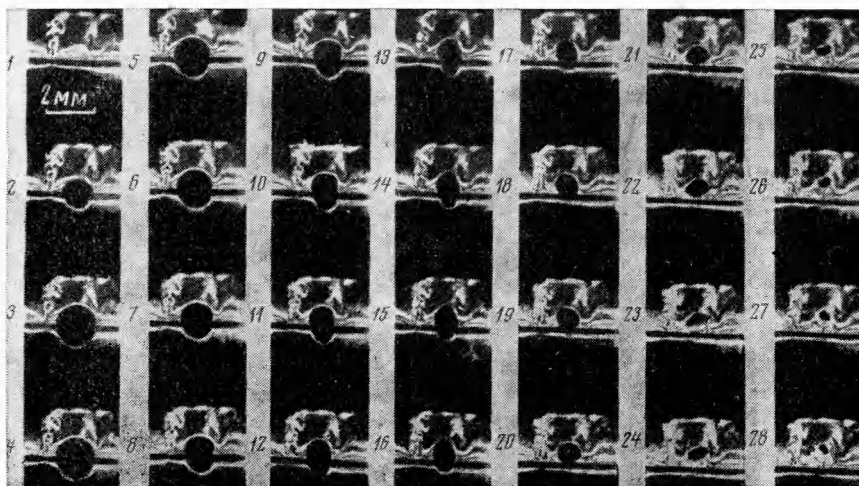
В работах [1-3] для изучения механизма теплообмена при кипении использовались оптические методы. Однако полученные в этих работах результаты носят в основном качественный характер.

В [4] дано описание дифракционного интерферометра, позволяющего производить как качественное, так и количественное изучение процессов, происходящих в теплово-вом пограничном слое при кипении.

В [5, 6] изложены результаты исследования профилей температур в теплово-м пограничном слое. Показано, что по интерферограммам теплового пограничного слоя можно рассчитывать с точностью до 20% локальные распределения температур, а следовательно, и локальные тепловые нагрузки.

Ниже приводятся результаты экспериментального исследования механизма теплообмена при пузырьковом кипении воды с недогревом в свободном объеме в условиях атмосферного давления. Опыты проводились с помощью фото- и киносъемок на экспериментальной установке, описанной в [4]. Фотосъемка производилась с масштабом увеличения в 3 ÷ 4 раза фотоаппаратом «Зенит-3М», киносъемка в натуральную величину — скоростной кинокамерой СКС-1. Из-за большего масштаба увеличения фотосъемка позволила получать более четкие интерферограммы, чем киносъемка. Поэтому для количественной обработки использовались интерферограммы, полученные при фотосъемке. Нагревательные элементы изготавливались из проволоки диаметром 0.07 ÷ 0.4 мм или тонких лент шириной 0.7 ÷ 1.5 мм и толщиной несколько сотых миллиметра. В ряде опытов ленты наклеивались на основание из стеклотекстолита. Материал нагревателей — платина или никель.

На фиг. 1 приведена кинограмма процесса пузырькового кипения воды с недогревом на платиновой проволоке диаметром 0.15 мм, скорость съемки 7700 кадров в сек, тепловой поток $q_1 = 0.39 \cdot 10^6$ вт/м², температура стенки 130° С, температура жидкости 80° С. Светлый фон на кадрах кинограммы — тепловой пограничный слой. Темные линии в тепловом пограничном слое — интерференционные полосы. На кинограмме зафиксировано действие двух центров парообразования. Левый центр на кино-



Фиг. 1

грамме представлен в виде струи перегретой жидкости. Фазы роста, отрыва и конденсации пузыря для данного центра парообразования отсутствуют. Появление пузыря в правом центре фиксируется на втором кадре. На кадрах 2 ÷ 4 происходит рост пузыря, на кадрах 5 ÷ 21 — конденсация до момента отрыва, а на кадрах 22 ÷ 28 — конденсация после отрыва.

Рассмотрение всех кадров кинограммы (~ 5000 кадров) позволило установить следующее:

1. Характер процесса в каждом действующем центре парообразования воспроизводится в пределах одного режима. В таблице приведены результаты обработки кинограммы.

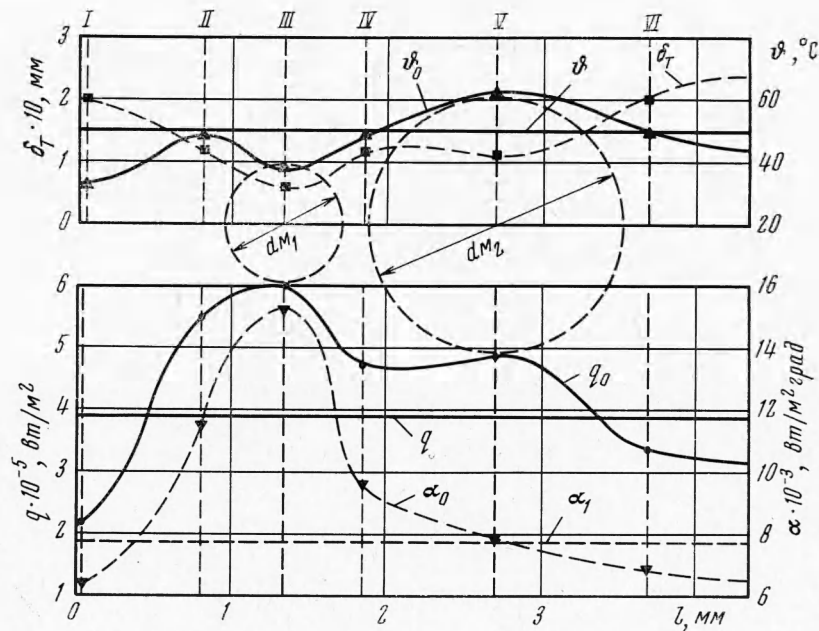
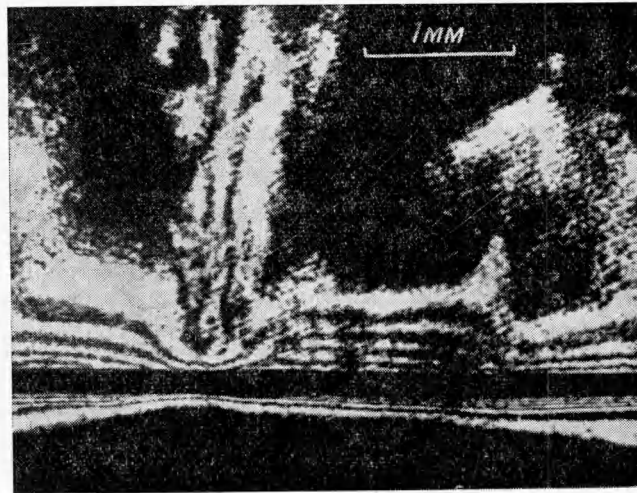
	1		2		3		4		5		6			
	$d_M \cdot 10^3, \text{ м}$	$\tau_* \cdot 10^3, \text{ сек}$	$\tau_p \cdot 10^3, \text{ сек}$	$\tau_0 \cdot 10^3, \text{ сек}$	количе- ство	d_M	τ_*	τ_p	τ_0					
						%	%	%	%					
Левый	0.75	1.26	0.3	8.6	46	4	2	3	0.3					
Правый	1.7	5.4	0.3	68	8	10	4	6	4					

Из таблицы видно, что среднеквадратичная ошибка определения основных характеристик действующих центров парообразования не превышает 10%. В таблице: 1 — максимальный диаметр d_M ; 2 — время жизни — время от момента зарождения до момента захлопывания пузыря; 3 — время роста — время, за которое пузырь достигнет максимального размера; 4 — период выжидания — время от захлопывания предыдущего пузыря до зарождения следующего; 5 — количество обработанных пузырей; 6 — среднеквадратичная ошибка. При определении времени жизни замерить время до полной конденсации не удается, так как не позволяет масштаб увеличения. Поэтому определяемое время жизни — это время роста и конденсации пузыря до размеров 0.1 ÷ 0.2 от максимального.

2. В период выжидания в месте действия центров парообразования устойчиво существуют струи перегретой жидкости, которые образуются в результате отрыва и конденсации пузырей. Поскольку время рассеивания струи больше времени выжидания, на кинокадрах струи перегретой жидкости фиксируются как непрерывные.

3. Конденсация пузыря начинается с его боковых поверхностей, примыкающих к нагревателю. Отрывной диаметр пузыря меньше максимального. Форма пузыря близка к сфере в момент роста и отклоняется от нее при конденсации.

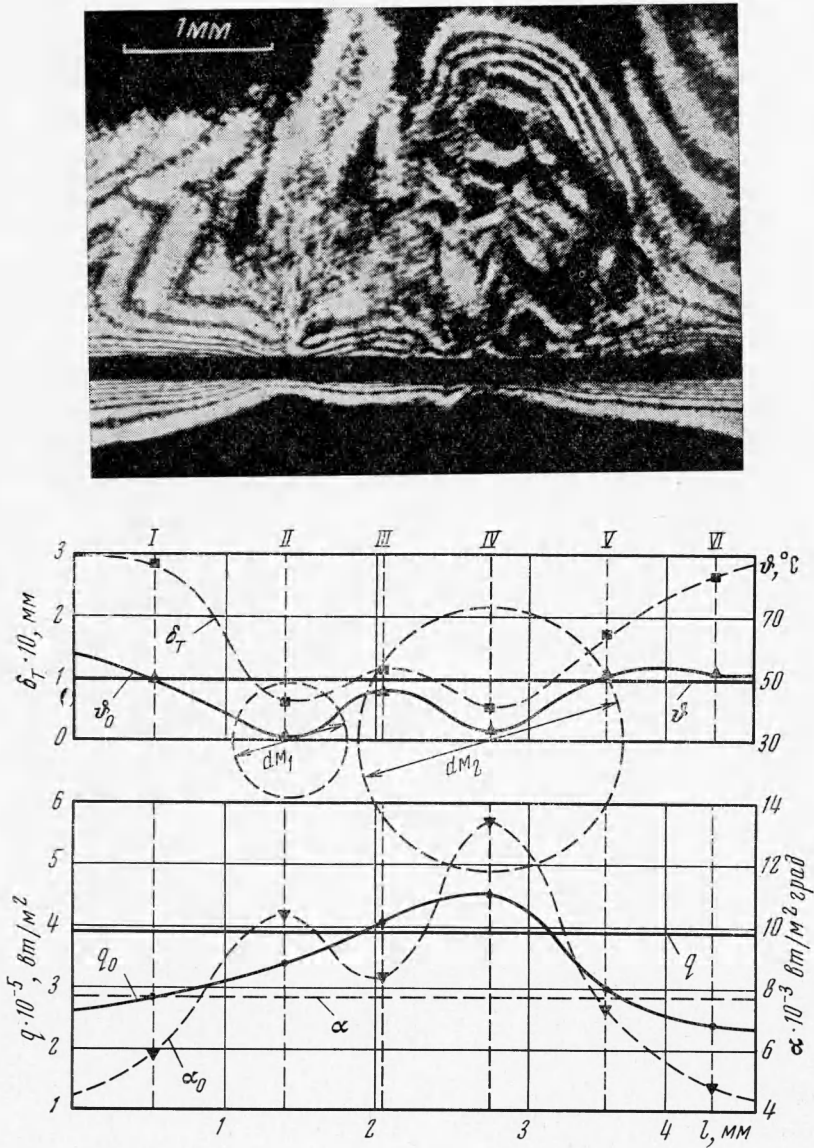
4. Появление пузырей приводит к изменению структуры теплового пограничного слоя. В период выжидания тепловой пограничный слой восстанавливается, в момент роста и конденсации пузыря — разрушается.



Фиг. 2

На фиг. 2, 3 приведены интерферограммы, заснятые при том же режиме, что и кинограмма на фиг. 1. На фиг. 2, а показана фотография — интерферограмма кадра № 1 кинограммы. На фиг. 2, б — распределение локальных тепловых потоков q_0 , температурных напоров ϑ_0 , коэффициентов теплоотдачи α_0 и толщин теплового пограничного слоя δ_T на нижней образующей проволоки. На фиг. 3, а — фотография — интерферограмма кипения воды с недогревом кадра № 28 кинограммы. На фиг. 3, б —

распределение локальных тепловых потоков q_0 , температурных напоров ϑ_0 , коэффициентов теплоотдачи α_0 , толщин теплового пограничного слоя δ_T для фотографии фиг. 3, а. Так как время экспозиции кадра при фотосъемке больше, чем при кино съемке, то интерферограммы фиг. 2, 3 соответствуют 33 кадрам кинограммы, показанной на фиг. 1. Поэтому паровые пузыри на интерферограммах не фиксируются.

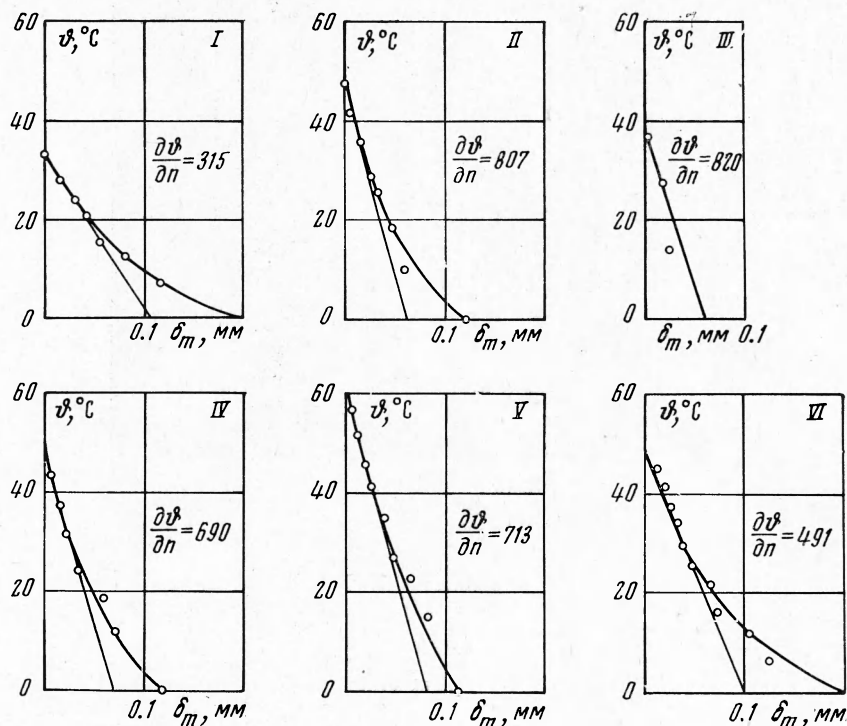


Фиг. 3

Интерферограмма фиг. 2 соответствует примерно первому и более ранним кадрам кинограммы, а интерферограмма фиг. 3 — последнему и более поздним кадрам.

Под интерферограммами приведены локальные значения толщины теплового пограничного слоя со стороны нижней образующей нагревателя, температурного напора, удельного теплового потока и коэффициента теплоотдачи. Толщина теплового пограничного слоя определялась как расстояние от нижней образующей нагревателя до края последней светлой интерференционной полосы. Температурный напор, удельный тепловой поток и коэффициент теплоотдачи получены путем расчета интерферограммы со стороны нижней образующей нагревателя.

Интерферогаммы позволяют определить поле показателей преломления в тепловом пограничном слое. Переход от поля показателей преломления к температурному производится с помощью известной формулы Лорентц — Лоренца. Методика расчета интерферогаммы приведена в [4]. В результате расчетов были получены температурные профили в тепловом пограничном слое. Профили, соответствующие интерферогамме фиг. 2, приведены на фиг. 4, а интерферогамме фиг. 3 — на фиг. 5.



Фиг. 4

Локальный температурный напор определялся как разность между температурой слоя жидкости на первой от нагревателя интерференционной полосе и температурой жидкости в объеме. Локальный удельный тепловой поток был найден путем графического дифференцирования профилей температур с использованием уравнения Фурье

$$q_0 = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1)$$

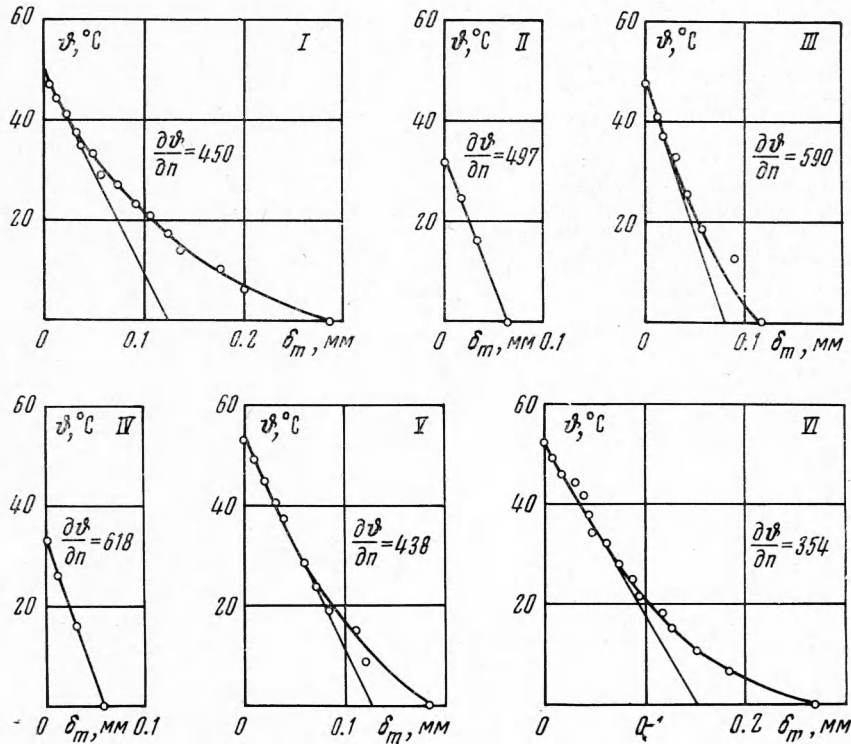
где q_0 — локальный удельный тепловой поток, λ — коэффициент теплопроводности жидкости, $\partial t / \partial n$ — градиент температуры у нагревателя. Значения градиентов температур в град/мм для различных по длине нагревателя сечений приведены на фиг. 4, 5. Номера сечений обозначены римскими цифрами и проставлены на фиг. 2, 3; линейный масштаб графиков совпадает с масштабом соответствующей фотографии. Локальный коэффициент теплоотдачи определялся как отношение локального теплового потока к соответствующему температурному перепаду

$$\alpha_c = \frac{q_0}{t_0 - t_*} = \frac{q_0}{\vartheta_0} \quad (2)$$

где t_0 — локальная температура нагревателя, рассчитанная по интерферогамме, t_* — температура жидкости в объеме, α_c — локальный коэффициент теплоотдачи. Локальная температура нагревателя принималась равной температуре на первой от нагревателя интерференционной полосе.

Анализ локальных характеристик теплообмена, приведенных на фиг. 2—5, позволяет сделать следующие выводы:

1. Толщина теплового пограничного слоя, локальный температурный напор, удельный тепловой поток и коэффициент теплоотдачи изменяются в значительных пределах по длине нагревателя. Так, по данным фиг. 2, 3 толщина теплового пограничного слоя изменяется в 5.3 раза, температурный напор — в 2 раза, удельный тепловой поток — в 3 раза, коэффициент теплоотдачи — в 2.6 раза на длине нагревателя в 4 мм.



Фиг. 5

2. Наиболее интенсивно теплоотдача осуществляется в местах действия центров парообразования. Зона действия центра равна $1 \div 1.5$ максимальным диаметрам пузыря. На фиг. 2, 3 максимальные диаметры пузырей показаны пунктирными окружностями.

3. В местах действия центров парообразования профили температур близки к линейным.

4. Тепловой пограничный слой восстанавливается в большей степени в тех центрах, где образуются пузыри с большими диаметрами, а следовательно, и с большими периодами выжидания.

На фиг. 2, 3 прямыми пунктирными и сплошными линиями показаны средние значения характеристик теплообмена, полученные по электрическим замерам. Из фигур видно, что локальные характеристики теплообмена согласуются со средними значениями.

Кино- и фотосъемка при кипении воды на проволоках других диаметров и пластинах дают такую же качественную картину. Увеличение недогрева до температуры насыщения приводит к уменьшению диаметров пузырей и времени их жизни. Однако и в этом случае в месте действия центров наблюдаются горячие струи жидкости. На пластине в стадии роста пузыри по форме близки к полусфере. Интерферограммы, полученные при кипении воды на пластинах, расшифровать сложнее, чем интерферограммы, полученные при кипении на проволоках. Для пластин шириной $0.7 \div 1.5$ мм основная трудность при расшифровке заключается в определении геометрической длины хода светового луча в тепловом пограничном слое.

[Поступила 17 IV 1972]

ЛИТЕРАТУРА

1. Isshiki N., Tamaki H. Photographic study of boiling heat transfer mechanism. Bulletin JSME, 1963, vol. 6., No. 23, p. 505.
2. Якобс, Шейд. Измерение температуры в процессе образования пузырьков при кипении в большом объеме. Теплопередача, Тр. Америк. об-ва инж.-механ., 1969, № 2.
3. Бихар М., Курто М., Рик Р., Семери Р. Основные проблемы процесса кипения жидкости, недогретой до температуры насыщения, при наличии и отсутствии растворенных газов. В сб. «Достижения в области теплообмена», М. «Мир», 1970.
4. Бараненко В. М., Кардашев Ю. Д. К вопросу использования оптического метода для исследования теплообмена при кипении. Тр. Николаевск. кораблестроительного ин-та, 1970, вып. 33.
5. Бараненко В. И. Экспериментальное исследование теплового пограничного слоя на тонких цилиндрических нагревателях при естественной конвекции в воде. Тр. Николаевск. кораблестроительного ин-та, 1970, вып. 37.
6. Смирнов Г. Ф., Бараненко В. И. Экспериментальное исследование профилей температур в тепловом пограничном слое при кипении жидкости в свободном объеме. Инж.-физ. ж., 1970, т. 21, № 2.

Технический редактор Э. Ф. Бунова

Сдано в набор 2/XII-1972 г. Т- 01454. Подписано к печати 7/II-1973 г. Тираж 1935 экз.
Зак. 1470. Формат бумаги 70×108^{1/16}. Усл. печ. л. 15,4. Бум. л. 5^{1/2}. Уч.-изд. л. 14,3.

2-я типография издательства «Наука». Москва, Шубинский пер., 10