

УДК 536.2

МЕТОД ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОТДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Д. М. Кузьменков, М. И. Делов, К. В. Куценко, А. А. Лаврухин

В работе рассмотрены условия интенсификации теплоотдачи при помощи воздействия коротких локальных тепловых импульсов на нагреватель, охлаждаемый жидкостями с гистерезисом кривой кипения (криогенные, органические жидкости и т.д.).

Ключевые слова: тепловой импульс, теплоотдача, криогенные жидкости, ВТСП.

Особенностью теплообмена в некоторых жидкостях, в том числе криогенных, является наличие гистерезиса на кривой пузырькового кипения, которая связывает плотность теплового потока q с разностью температур нагревателя и среды ΔT при квазистационарном увеличении и уменьшении q . Таким образом, при заданном q в области гистерезиса возможно существование двух режимов теплообмена: конвективный (кривая АВ на рис. 1) и режим пузырькового кипения (кривая СА). При этом коэффициент теплоотдачи в режиме пузырькового кипения жидкости α_{boil} может существенно превышать теплоотдачу для однофазной конвекции α_{conv} .

В работе [1] показана возможность интенсификации теплоотдачи к жидкому азоту при переходе от однофазной конвекции к пузырьковому кипению за счет воздействия короткого теплового импульса по всей длине нагревателя. При этом энергия теплового воздействия на нагреватель имеет пороговое значение. Величина этой энергии определяется достижением нагревателем предельной температуры гомогенной нуклеации T_{lim} при его адиабатическом разогреве.

Целью данной работы является проведение исследования, позволяющего оценить минимальную длину зоны пузырькового кипения и энергию локального теплового воздействия, необходимую для ее образования, которая приводит к распространению очага пузырькового кипения по всему нагревателю. Это позволит создать методику интенсификации теплоотдачи при помощи воздействия локальных тепловых импульсов определенной энергии, например, при помощи излучения лазера.

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: dmitrii.kuzmenkov@mail.ru.

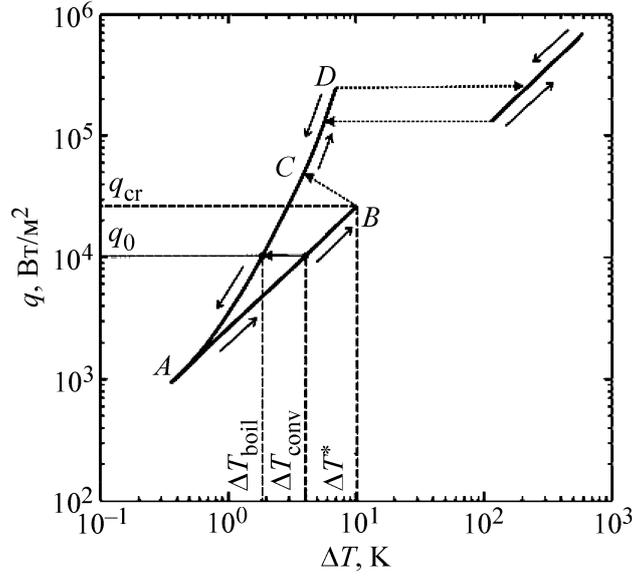


Рис. 1: Кривая кипения жидкого азота на вертикальном платиновом нагревателе диаметром $d = 100$ мкм и длиной $L = 23$ мм [1].

Для расчета минимальной длины локального участка возникновения пузырькового кипения рассмотрим задачу об устойчивости очага пузырькового кипения длиной l на тонком и длинном нагревателе, создающем тепловой поток q_0 (рис. 2). Распределение температуры по длине стержня находится из решения уравнения теплопроводности [2]:

$$\lambda_h \cdot d \cdot \frac{d^2 \Delta T(x)}{dx^2} - 4 \cdot \alpha(\Delta T) \cdot \Delta T(x) + 4 \cdot q_0 = 0, \quad (1)$$

где $\Delta T = T - T_{liq}$ – перегрев температуры нагревателя над температурой жидкости T_{liq} , d , λ_h – диаметр и коэффициент теплопроводности нагревателя.

Вид зависимости $\alpha(\Delta T)$ зададим, как

$$\alpha(\Delta T) = \begin{cases} \alpha_{conv}(\Delta T), & \text{при } \Delta T \geq \Delta T^*, \\ \alpha_{boil}(\Delta T), & \text{при } \Delta T < \Delta T^*. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь ΔT^* – температура смены режимов кипения (рис. 2). Тем самым на отрезке $-l/2 < x < l/2$ устанавливается режим пузырькового кипения, на остальной части – однофазная конвекция. Граничные условия:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta T(x)}{dx} = 0, & \text{при } x = 0, \\ \frac{d\Delta T(x)}{dx} = 0, & \text{при } x = \infty. \end{cases} \quad (3)$$

Из решения системы уравнений (1)–(3) и граничных условий на концах участка кипения получена зависимость длины участка пузырькового кипения l от перегрева ΔT^* :

$$l(\Delta T^*) = 2\sqrt{\frac{\lambda_h \cdot d}{2 \cdot \alpha_{\text{boil}}}} \cdot \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\alpha_{\text{boil}}}{\alpha_{\text{conv}}}} \cdot \frac{\Delta T^* \cdot \alpha_{\text{conv}} \cdot \alpha_{\text{boil}} - q_0 \cdot \alpha_{\text{conv}}}{q_0 \cdot \alpha_{\text{boil}} - \Delta T^* \cdot \alpha_{\text{conv}} \cdot \alpha_{\text{boil}}} \right). \quad (4)$$

Из (4) следует, что решение поставленной задачи существует при $\Delta T^* > \Delta T_{\text{lim}}^*$, где

$$\Delta T_{\text{lim}}^* = \frac{q_0}{\sqrt{\alpha_{\text{conv}} \cdot \alpha_{\text{boil}}}}. \quad (5)$$

Представим $\Delta T^* = b \cdot \Delta T_{\text{lim}}^* + (1-b) \cdot \Delta T_{\text{conv}}$, где коэффициент $b < 1$. Для нахождения коэффициента b рассмотрим процесс перехода к пузырьковому кипению (точка В на рис. 1). В этом режиме естественная конвекция становится неустойчивой и достаточно возникновения даже одного парового пузыря на нагревателе, чтобы пузырьковое кипение самопроизвольно развилось по всей длине нагревателя. Тогда минимальная длина участка пузырькового кипения l близка по значению к отрывному диаметру парового пузыря в жидком азоте $d_{\text{tear}} \sim 0.5$ мм [3]:

$$l(\Delta T^*)|_{q_0=q_{\text{cr}}} = d_{\text{tear}}, \quad (6)$$

где q_{cr} – поток, при котором закипает жидкость.

На рис. 3 представлена расчетная зависимость длины зоны пузырькового кипения от плотности теплового потока $l(q_0)$ при значении коэффициента $b = 0.75$ и при начальной температуре жидкости, равной температуре насыщения T_s . Видно, что минимальное значение длины l соответствует отрывному диаметру пузыря и достигается при плотности теплового потока $q_0 = q_{\text{cr}}$, соответствующей точке В на рис. 1.

Проведем оценку минимального количества энергии теплового импульса, требуемой для образования пузырькового кипения на участке нагревателя длиной l . Воздействие локального теплового импульса приводит к мгновенному перегреву нагревателя на длине l до величины предельного перегрева гомогенной нуклеации в жидком азоте $\Delta T_{\text{lim}} = 33$ К [3]. Тогда формула для расчета минимальной энергии имеет следующий вид:

$$E_{\text{min}}(q_0) = (\rho \cdot C_p)_h \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l(q_0) \cdot \left(\Delta T_{\text{lim}} - \frac{q_0}{\alpha_{\text{conv}}} \right), \quad (7)$$

где $\frac{q_0}{\alpha_{\text{conv}}} = \Delta T_0$ – начальное значение перегрева теплоотдающей поверхности до момента подачи теплового импульса. При этом длительность теплового импульса τ_{imp} должна быть порядка:

$$\tau_{\text{imp}} \approx d^2 \cdot \frac{(\rho \cdot C_p)_h}{\lambda_h}, \quad (8)$$

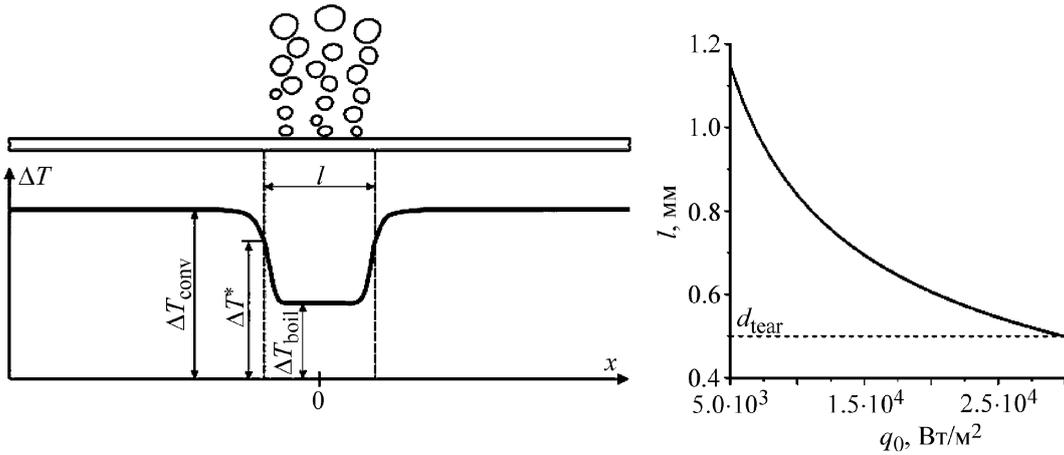


Рис. 2: Качественный вид распределения перегрева теплоотдающей поверхности по длине нагревателя.

Рис. 3: Зависимость минимальной длины участка пузырькового кипения l от начальной плотности теплового потока q_0 .

что для платинового нагревателя диаметром $d = 100$ мкм составляет величину порядка 100 мкс.

Зависимость минимальной энергии теплового импульса, необходимого для интенсификации теплоотдачи, от начального теплового потока q_0 для платинового нагревателя диаметром $d = 100$ мкм представлена на рис. 4(а). На этом же графике представлены экспериментальные данные по энергии теплового импульса по всей длине нагревателя [1]. Как видно из рисунка, абсолютное значение энергии для случая локального воздействия составляет на порядок меньшую величину.

Аналогичная задача о нахождении устойчивого очага пузырькового кипения радиусом l была решена для случаев одно- и двухсторонне охлаждаемой тонкой плоской пластины толщиной h . В результате получено уравнение для минимального радиуса участка пузырькового кипения l в зависимости от перегрева ΔT^* в виде:

$$\frac{q_0}{\Delta T^*} = \frac{\sqrt{\alpha_{\text{boil}} \cdot \alpha_{\text{conv}}} \cdot K_1(\sqrt{\varepsilon} \cdot \alpha_{\text{conv}} l) \cdot I_0(\sqrt{\varepsilon} \cdot \alpha_{\text{boil}} l) + \alpha_{\text{boil}} \cdot K_0(\sqrt{\varepsilon} \cdot \alpha_{\text{conv}} l) \cdot I_1(\sqrt{\varepsilon} \cdot \alpha_{\text{boil}} l)}{K_0(\sqrt{\varepsilon} \cdot \alpha_{\text{conv}} l) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{\text{boil}}}{\alpha_{\text{conv}}}\right) + \frac{\alpha_{\text{boil}}}{\alpha_{\text{conv}}}}, \quad (9)$$

где $\varepsilon = (\lambda \cdot h)^{-1}$ для односторонне охлаждаемой пластины и $\varepsilon = 2 \cdot (\lambda \cdot h)^{-1}$ для двухсторонней. Анализ соотношения (9) показывает, что решение задачи существует при $\Delta T^* > \Delta T_{\text{lim}}^*$, где ΔT_{lim}^* рассчитывается по формуле (5).

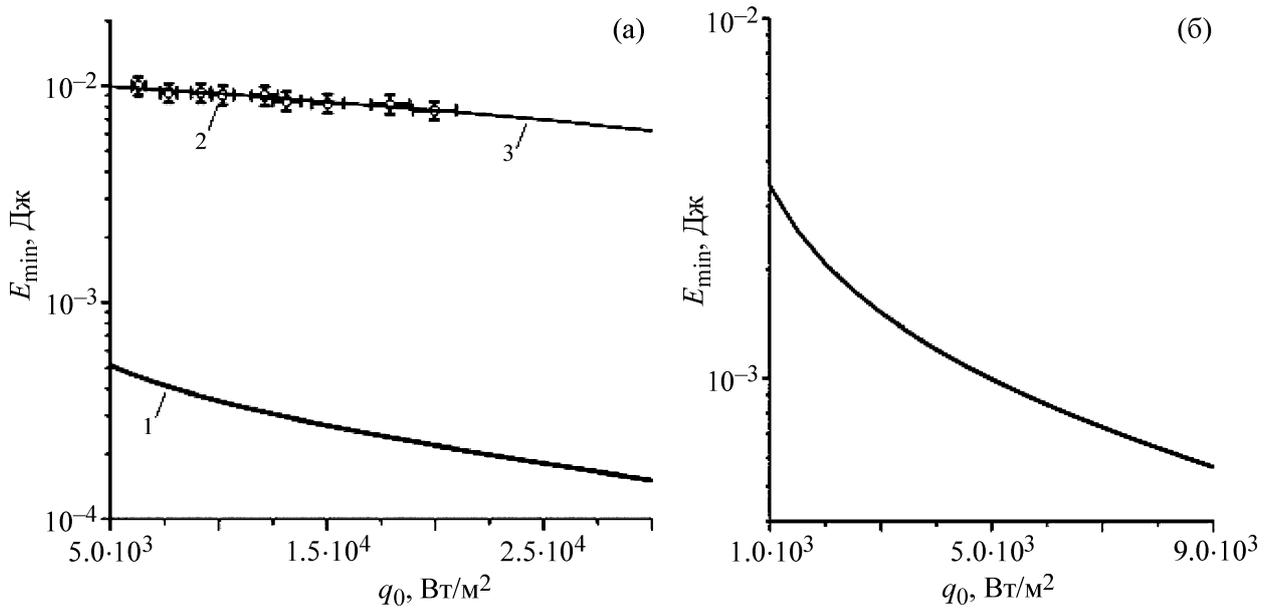


Рис. 4: Зависимость минимальной энергии, необходимой для перехода к пузырьковому кипению, от начальной плотности теплового потока: (а) цилиндрический нагреватель (теплопроводность $\lambda_h = 70 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, удельная теплоемкость $(\rho \cdot C_p)_h = 1.85 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$). 1 – расчет по (7); 2, 3 – экспериментальные данные и расчет для случая воздействия теплового импульса на всю длину $L = 23 \text{ мм}$ нагревателя [1]; (б) Ni-W лента ($\lambda_h = 17 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $(\rho \cdot C_p)_h = 1.5 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$).

На рис. 4(б) представлены результаты расчета минимальной энергии теплового импульса для вертикально-ориентированной двухсторонне охлаждаемой Ni-W ленты толщиной $h = 80 \text{ мкм}$, используемой в качестве подложки для высокотемпературных сверхпроводников второго поколения. Данные по теплоотдаче в режиме однофазной конвекции и пузырькового кипения для Ni-W ленты были представлены в работе [4]. Значение ΔT^* находилось по формуле (6) при $b = 0.21$.

Формула для расчета минимальной энергии для плоского нагревателя примет следующий вид:

$$E_{\min}(q_0) = (\rho \cdot C_p)_h \cdot h \cdot \pi \cdot l^2(q_0) \cdot \left(\Delta T_{\text{lim}} - \frac{q_0}{\alpha_{\text{conv}}} \right). \quad (10)$$

В данной работе предложен метод интенсификации теплоотдачи путем воздействия локальных тепловых импульсов. Показано, что рассмотренный метод локального воздействия для интенсификации теплоотдачи существенно более выгоден энергетически, чем воздействие теплового импульса на всю длину нагревателя.

Предложенный метод может быть использован в системах тепловой стабилизации сверхпроводникового оборудования на основе ВТСП, охлаждаемых жидким азотом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16–19–10548).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] B. V. Balakin, M. I. Delov, K. V. Kutsenko, et al., *Cryogenics* **67**, 1 (2015).
- [2] S. Yu. Afanas'ev and S. A. Zhukov, *High Temperature* **33**, 268 (1995).
- [3] В. И. Веркин, Ю. А. Кириченко, К. В. Русанов, *Теплообмен при кипении криогенных жидкостей* (Киев, Наук. думка, 1987).
- [4] B. V. Balakin, M. I. Delov, K. V. Kutsenko, et al., *Cryogenics* **65**, 5 (2015).

По материалам V Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 июля 2016 г.