

Кулінченко В. Р.

Дубковецький І. В.

Деменюк О. М.

**Національний
університет
харчових
технологій**

УДК 621.1.13

ПЕРЕМІЖНІСТЬ ПРИ КИПІННІ В ВЕЛИКОМУ ОБ'ЄМІ

Сделана попытка проанализировать пульсации температур при кипении в предположении, что кипение в большом объеме представляет собой явление перемежаемости с дискретными подсистемами. Показано, что критерии, принятые для определения индикаторной функции, позволяют получить воспроизводимые результаты, которые соответствуют принятой методологии.

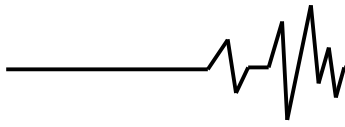
An attempt has been made to analyse the temperature pulsations at boiling at a suggestion that boiling is an intermittence phenomenon with discrete subsystems pool-boiling. It was shown that criterion accepted for the determinations of an indicator function allow getting the repeatable results which correspond to suggested methodology.

Результати, отримані при аналізі температурних пульсацій в двофазній системі, свідчать про те, що інформація, яку несуть самі температурні пульсації, вимагає нового методологічного підходу для її розшифровки і використання з метою кращого розуміння процесу кипіння. Статистична природа температурних пульсацій під час кипіння відповідає явищам, які мають місце в різних середовищах. Це значить, що температурні пульсації в окремих середовищах мають свої притаманні їм характеристики. Існуючі уявлення про статистичну природу поля змінних величин в двофазному пограничному шарі вкрай обмежені. Ця обставина відноситься також і до температурних пульсацій у двофазному пограничному шарі. Застосування класичного статистичного методу для часового і просторового осереднення вимагає використання додаткових пропозицій для отримання відповідних середніх значень.

Відомо, що процес кипіння характеризується явищами переміжності, які описуються певними характеристичними і параметричними показниками. Мабуть детермінована поведінка бульбашки в перегрітій рідині визначає підходи, що ґрунтуються на візуалізації спостережень і теоретичному аналізі поведінки окремих бульбашок. Цей підхід дозволяє отримати інформацію, яка сприяє кращому розумінню механізму перенесення теплоти при кипінні.

Існує ряд параметрів, пов'язаних з характерними явищами, які спостерігаються при дослідженні поведінки індивідуальних бульбашок. Ці параметри мають зміст тільки для аналізу поведінки індивідуальної бульбашки, що відповідає кипінню у великому об'ємі за наявності дискретних центрів пароутворення. Інший підхід до вивчення процесу кипіння ґрунтується на спостереженні поведінки киплячого середовища і її осереднених характеристик. Маючи на увазі, що процес теплообміну при кипінні пов'язаний з перемішуванням рідини під час росту бульбашки і її випаровуванням на границі розділу фаз рідина – пара, більшість дослідників сконцентрували свою увагу на зміні осереднених характеристик теплообміну і їх залежності від перегріву рідини біля гріючої стінки. Обмеженість застосування цих залежностей пояснюється, головним чином, недостатністю знання про механізм теплообміну особливо при сукупній поведінці парових бульбашок. Як відомо, статистична природа процесу кипіння є наслідком сумісної взаємодії бульбашок. Інтенсивний рух рідини біля поверхні теплообміну визначається регулярністю процесу росту бульбашок і викликає невизначеність поведінки процесу, що розглядається.

Існуючі уявлення про явища переміжності обмежені їх ідеалізованим розглядом, зазвичай, що стосується росту і спливанню одиночної



бульбашки. Як відомо, колективна поведінка великої кількості подій, які відбуваються завжди, пов'язана зі статистичними властивостями індивідуальних параметрів, які описують індивідуальний процес. Теплообмін при кипінні рідини представляє собою процес, який визначається відповідними параметрами, що описують поле температур і швидкості в пограничному шарі. Зараз статистична картина названого поля змінних в двофазному пограничному шарі не вивчена.

Для більш повного вивчення статистичних властивостей поля змінних величин в двофазному пограничному шарі необхідно намагатися виміряти і проаналізувати пульсації температур. Перегрів рідини при кипінні в великому об'ємі є рушійним термодинамічним процесом переносу теплоти. Таким чином, температурне поле в двофазному пограничному шарі являє собою один з основних параметрів, який визначає процес кипіння. Виходячи з цього, метою наших досліджень було вивчення механізму теплообміну при кипінні за допомогою дослідження статистичної природи пульсацій температури біля гріючої стінки.

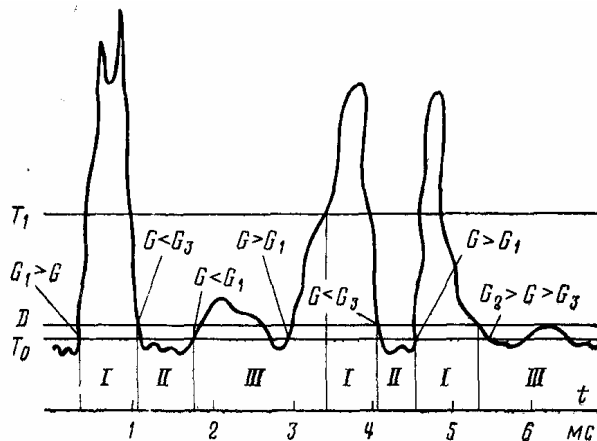


Рис.1. Пульсації перегріву рідини в двофазному пограничному шарі

На рис.1 наведено типовий приклад пульсацій перегріву рідини у фіксованій точці двофазного пограничного шару при кипінні на горизонтальній поверхні. Порівнюючи цю діаграму з кінокадрами швидкісної кінозйомки, можна виділити три різних характерних періоди. Період I відповідає часу, коли гарячий спай термопари знаходиться в рідкому перегрітому шарі, яка оточує бульбашку під час її росту. Період II представляє собою час, протягом якого термопара знаходиться в парі, а період III визначає час, протягом якого гарячий спай знаходиться в оточуючій рідині. Очевидно, що

термопара буде давати змінні показники температур перегріву рідини, які відповідають температурі рідини і пари. Границя між цими областями у двофазному пограничному шарі визначається двома параметрами: рівнем температури і швидкістю зміни температури між областями.

Кожна область має свої власні температурні пульсації, які характеризуються відповідною швидкістю зміни температури. Зміна температури в рідкому перегрітому пограничному шарі має канонічний характер і, таким чином, раптове збільшення температури у цьому шарі слідує після зменшення температури, яке підпорядковується такому ж функціональному зв'язку. Це показує на детерміновану природу зміни температури в рідкому перегрітому шарі. Тому що пульсації температури в парі незначні, їх дисперсія буде теж малою. Крім цього, звідси виходить, що область пари характеризується невеликими пульсаціями амплітуди. Очевидно, що зміна температури в рідині обумовлена турбулентним перемішуванням, викликана рухом рідини в двофазному пограничному шарі. Ці характерні особливості кожної області підтверджують вибір критеріїв для визначення функції переміжності, яка описує область до якої належить індивідуальна фіксована точка двофазного пограничного шару.

Зазвичай функція переміжності у точці $M(x)$ для області D визначається наступним чином:

$$I(x, \tau) = \begin{cases} 1 & M(x) \in D; \\ 0 & m(x) \notin D. \end{cases}$$

Для двофазної киплячої системи з трьома різними областями (рідким перегрітим шаром S , оточеному рідиною T і парою P) функцію переміжності можна визначити наступним чином. Спочатку розглянемо функцію переміжності для області P . За визначенням вона дорівнює:

$$I(x, \tau) = \begin{cases} 1 & M(x) \in P; \\ 0 & m(x) \notin P. \end{cases}$$

Тоді

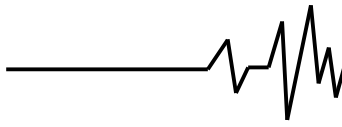
$$\gamma = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau_0} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_0} I(\tau) d\tau \quad (x = x_0).$$

Якщо пульсації температури

$$T(x, \tau) = T(x) + \theta(x, \tau),$$

то можна визначити середні значення $T(x, \tau)$ для окремих областей:

- для області P



$$\overline{T(x) + \theta(x, \tau)^P} = T^P = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_0} I(\tau) [T + q(\tau)] d\tau \quad (x = x_0);$$

- для області S

$$\overline{T(x) + \theta(x, \tau)^S} = T^S = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{(1-\gamma)\beta\tau_0} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_0} I(\tau) J(\tau) [T + q(\tau)] d\tau \quad (x = x_0);$$

- для області T

$$\overline{T(x) + \theta(x, \tau)^T} = T^T = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{(1-\gamma)(1-\beta)\tau_0} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_0} [1-I(\tau)] [1-J(\tau)] [T + \theta(\tau)] d\tau \quad (x = x_0);$$

де β – середнє значення об'ємної частки перегрітої рідини в області S, γ – середнє значення об'ємної частки пари в області P.

Виходячи з цих залежностей, пульсація температури у двофазній системі становить:

$$\theta(x, \tau) = I(x, \tau) [T(x)^P + \theta(x, \tau)^P] + [1-I(x, \tau)] J(x, \tau) [T(x)^S + \theta(x, \tau)^S] + [1-I(x, \tau)] [1-J(x, \tau)] [T(x)^T + \theta(x, \tau)^T] - \gamma(\tau) T(x)^P - [1-\gamma(x)] \beta(x) T(x)^S - [1-\gamma(x)] [1-\beta(x)] T(x)^T.$$

Звідси слідує, що середньоквадратичне значення температурної пульсації в будь-якій точці двофазної системи дорівнює:

$$\overline{\theta^2(x)} = \gamma(x) [\overline{\theta(x)^2}]^P + [1-\gamma(x)] \beta(x) [\overline{\theta(x)^2}]^S + [1-\gamma(x)] [1-\beta(x)] [\overline{\theta(x)^2}]^T + \gamma(x) [1-\gamma(x)] [T(x)^P - T(x)^T] + \beta(x) [1-\beta(x)] [T(x)^P - T(x)^T],$$

де

$$\overline{\theta^2(x)}^P = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{\gamma\tau_0} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_0} I(\tau) \theta^2(\tau) d\tau;$$

$$\overline{\theta^2(x)}^S = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{(1-\gamma)\beta\tau_0} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_0} [1-I(\tau)] J(\tau) \theta^2(\tau) d\tau;$$

$$\overline{\theta^2(x)}^T = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{(1-\gamma)(1-\beta)\tau_0} \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_0} [1-I(\tau)] [1-J(\tau)] \theta^2(\tau) d\tau.$$

У кожному окремому випадку визначення функції переміжності залежить від характеру явищ, що розглядаються. Зазвичай метод, що застосовується, повинен спиратися на вибір властивостей кожної області, які досить різноманітні, щоб бути використаними в якості критеріїв для виділення індивідуальної області. Аналіз явищ переміжності в турбулентному потоці рідини ґрунтується на використанні різних форм індикаторної функції. Ці форми визначаються у відповідності з типом розглядуваного потоку.

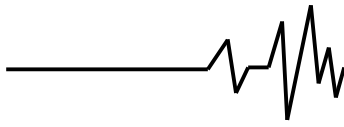
Необхідно відмітити, що індикаторна функція повинна мати таку форму, яка являється критерієм вибору для певного часу, на протязі якого інструмент знаходиться в конкретній області. Це значить, що кожна область може визначатися за допомогою властивостей її індикаторної функції. З природи розглядуваних явищ очевидно, що для двофазного пограничного шару при кипінні в об'ємі на горизонтальній поверхні

температурний перегрів має різні властивості в будь-якій окремій підсистемі, тобто в перегрітому шарі рідини S, оточуючої рідини T і пари P.

Температура в точці M(x) є безперервною функцією часу, абсолютне значення якої змінюється під час переходу від однієї області до іншої. Необхідно відмітити, що температура рідини перегрітого шару завжди дорівнює температурі, яка безпосередньо відповідає виходу точки M(x) з парової чи рідкої фази. Кількість руху точки M(x), яка переходить з однієї області до іншої, тобто з P в S чи T, визначається характерною похідною температури в часі, яка відповідає цьому стрибку. Крім цього, перехід від перегрітого шару до оточуючої рідини визначається відповідною похідною температури в часі, зв'язаною з процесом перенесення теплоти між цими двома областями. Це значить, що теплота акумульована в рідкому пограничному шарі, частково передається оточуючій рідині за рахунок теплопровідності, визначаючи відповідну швидкість зміни температури на границі областей двофазного пограничного шару.

Аналогічний випадок має місце при переході від оточуючої рідини до області перегрітого шару. З цього аналізу явищ, які відбуваються на границі між областями, виходить, що функція переміжності пульсацій температури в двофазному пограничному шарі може бути отримана з використанням індикаторної функції $\partial T/\partial t$. Для отримання надійних результатів необхідно ввести додаткові критерії, які визначаються особливостями температурних пульсацій в киплячій двофазній системі. Відомо, що температура парової фази не схильна до пульсацій і відповідає температурі насичення, в той час як пульсації в рідкому пограничному шарі відповідають тим пульсаціям, які спостерігалися в системі за самих високих температур.

Далі слідує, що крім похідної температури в часі критерії для визначення функції переміжності повинні також включати в себе рівень температури. Таким чином індикаторні функції для температурних пульсацій в двофазному пограничному шарі будуть: T і $\partial T/\partial t$. Граничні умови індикаторної функції повинні задовольняти умову, що помилка розподілу ймовірності буде одна і та ж для кожної області. У цей аналіз необхідно ввести два обмеження для рівнів температури: температуру насичення T_0 і температуру перегріву T_1 . Граничне значення для похідної температури в часі $G = \partial T/\partial t$ визначається за



допомогою трьох характерних значень похідної температури в часі: для входу в перегрітий шар G_1 , входу в оточуючу рідину G_2 і входу в парову фазу G_3 .

Характерні рівні температури визначаються наступним чином: температура T_0 відповідає температурі насичення для даного тиску, T_1 – збільшенню температури насичення на подвійну величину стандартного відхилення ймовірності амплітуди, тобто $T_1 = T_0 + 2\sigma$.

Граничні значення похідних температури в часі визначаються так: похідні температури в часі для входу в перегрітий шар G_1 дорівнює подвоєному значенню відхилення розподілу ймовірності похідної температури в часі $G_1 = 2\sigma_g$. Похідна температура в часі для входу в оточуючу рідину визначається дослідним шляхом $G_2 = 0,2^\circ\text{C}/\text{мс}$. Похідна температура в часі для входу в парову фазу становить $G_3 = 1,5\sigma_g$.

Виходячи з фізичної картини двофазного пограничного шару, границі між областями визначалися з використанням граничних значень індикаторної функції. З цією метою визначалися умови переходу точки $M(x)$ з одної області в іншу. Умовна вибірка температурного сигналу виконувалася за допомогою мікротермопари, а запис функцій переміжності здійснювався з використанням наступних критеріїв:

1. Температурний сигнал буде відповідати температурі рідини перегрітого шару, доки для $T_0 < T < T_1$ задовольняються наступні умови:

- при $G \leq G_3$ термопара входить в парову фазу;
- при $G_2 < G < G_1$ термопара входить в оточуючу рідину.

2. Температурний сигнал буде відповідати температурі парової фази, доки для $T > T_0$ задовольняються наступні умови:

- при $G > G_1$ термопара входить в перегрітий шар;
- при $0 < G < G_1$ термопара входить в оточуючу рідину.

3. Температурний сигнал буде відповідати температурі оточуючої рідини, доки задовольняються наступні умови:

- для $T > T_1$ при всіх значеннях G_1 термопара входить в перегрітий шар;
- для $T_1 > T > T_0$ при $G > G_1$ термопара входить в перегрітий шар;
- для $T < T_1$ при $G \leq G_1$ термопара входить в парову фазу.

Не дивлячись на те, що під час аналізу використовувалися індикаторні функції, які дозволили визначити різні області на підставі

цих критеріїв, але все ж таки необхідні подальші дослідження інших індикаторних функцій. Це представляється особливо важливим для вивчення інших двофазних систем.

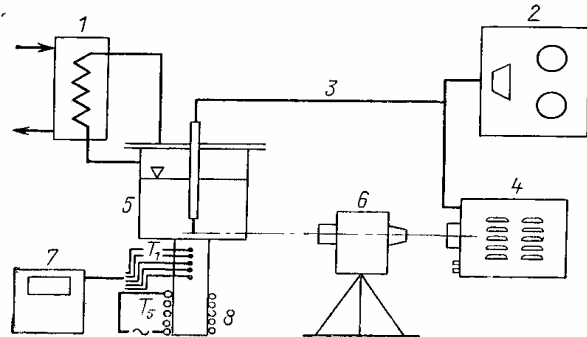
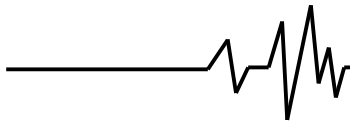


Рис.2. Дослідна установка для вимірювання пульсацій температури:
1 – конденсатор; 2 – магнітофон;
3 – мікротермопара; 4 – осцилограф;
5 – дослідна посудина; 6 – кінокамера;
7 – самописець; 8 – електронагрівач

Вимірювання температурних пульсацій здійснювалося у великому об'ємі на горизонтальній поверхні. Дослідна установка наведена на рис.2. Вимірювання виконувалися за атмосферного тиску і теплових потоках на поверхні 197000 і 251000 Вт/м². Для вимірювання температури використовувалася хромель-алюмельова мікротермопара діаметром $12,5$ мкм. Положення гарячого спаю мікротермопари відносно гріючої поверхні визначалося за допомогою мікрометричного пристрою. Пульсації температури вимірювалися при п'яти різних положеннях термопари: $\delta = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ і $3,0$ мм. Аналоговий сигнал підсилювався в 2675 раз і записувався на магнітофонній стрічці зі швидкістю $1,524$ м/с. Час запису сигналу для кожного положення термопари складав $t_0 = 60$ с і представляв собою одиничну реалізацію.

Аналоговий сигнал, який записувався на магнітофонній стрічці відтворювався зі швидкістю $0,381$ м/с, і, таким чином, дійсний час множився на коефіцієнт 4 . Це давало можливість зменшити час вибірки на той самий коефіцієнт. Дійсний час вибірки складав $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$ с. Кожен сигнал перетворювався в цифрову форму і видавався на магнітофонну стрічку для подальшого аналізу на ЕОМ. Перша частина розрахунку зводилася до визначення середнього значення T для всіх реалізацій і розрахунку функції щільності ймовірності. Після цього використовувалися умовні критерії для функції переміжності і знаходилася відповідна частина сигналу належної до частотної



підсистеми. Наступною операцією був розрахунок функцій щільності ймовірності для кожної системи. В кінцевій стадії цього аналізу розраховувалися середні значення температури T/S , T/P , T/T і T для кожної окремої підсистеми.

переміжності на пульсаційний сигнал температури.

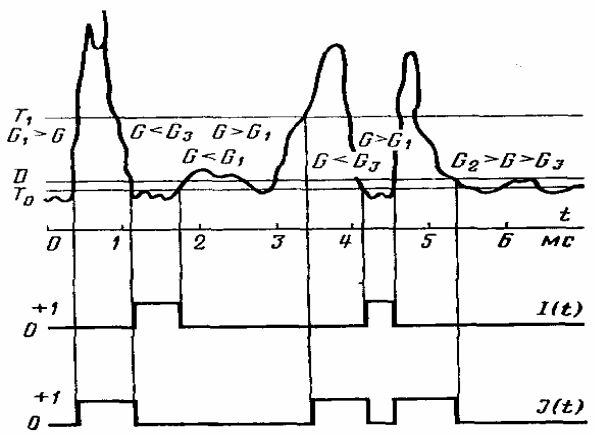


Рис.3. Сигнал мікротермопар і відповідна йому функція переміжності

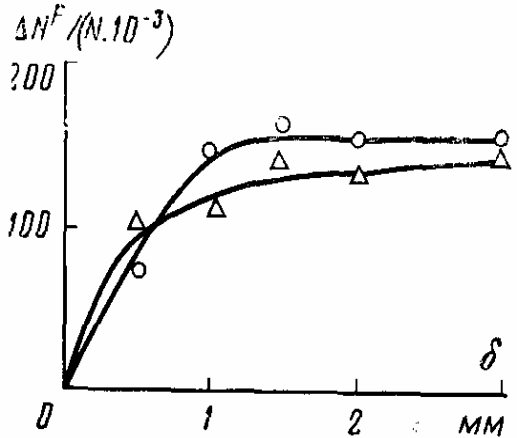


Рис.4. Розподіл об'ємної частки парової фази в киплячому пограничному шарі: Δ – $q = 197300$, \circ – 251700 Wm/m^2

На рис.3 наведений типовий сигнал з відповідною функцією переміжності. З визначення функції переміжності $I(t)$ виходить, що середнє значення цієї функції $\gamma(x)$ представляє собою об'ємну частку парової фази у точці $M(x)$. На рис.4 показано отримане в цьому аналізі розподілення об'ємної частки пари в киплячому пограничному шарі, на рис.5 – розподіл щільності ймовірності пульсацій температури на відстані від стінки 0,5 мм. Відповідні функції переміжності отримано при застосуванні критеріїв умовної вибірки пульсаційного сигналу термопар. Це дозволяє отримати функції переміжності $I(t)$ і $J(t)$. У свою чергу відповідна частина сигналу для кожної підсистеми отримана шляхом множення функції

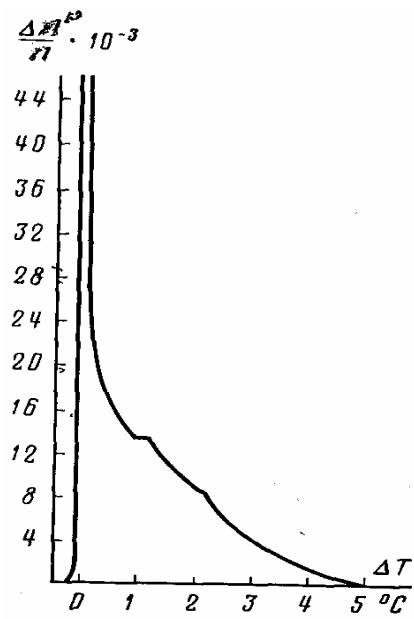


Рис.5. Розподіл щільності ймовірності пульсацій температури на відстані від стінки 0,5 мм при тепловому потоці 257300 Wm/m^2

На рис.6...8 наводяться функції щільності ймовірності температурних пульсацій для кожної підсистеми, отримані для п'яти різних відстаней від гріючої стінки.

На рис.6 наводяться розподіли щільності ймовірності пульсацій температури в паровій області. З цього рисунка видно, що амплітуда пульсацій температури в парі мала, а дисперсія практично постійна для всіх відстаней від стінки. Найбільше спотворення розподілу щільності ймовірності при температурі перегріву, очевидно, обумовлене недоліками критеріїв, які використовувалися для умовних вибірок. Якщо порівняти кількість амплітуд, пов'язаних з цим спотворенням розподілу, з сумарною кількістю амплітуд у паровій фазі, то можна бачити, що отримана похибка не перевищує 1%.

На рис.7 наведено розподіл щільності ймовірності температурних пульсацій в перегрітому рідкому шарі. Треба зауважити, що під час аналізу підрахунку сигналів розрахунок кількості входів в перегрітий шар також ґрунтується на раніше прийнятих припущеннях, оскільки характер розподілу щільності ймовірності в області перегрітого шару дуже близька до розподілу щільності ймовірності, отриманих для канонічних пульсацій температури.

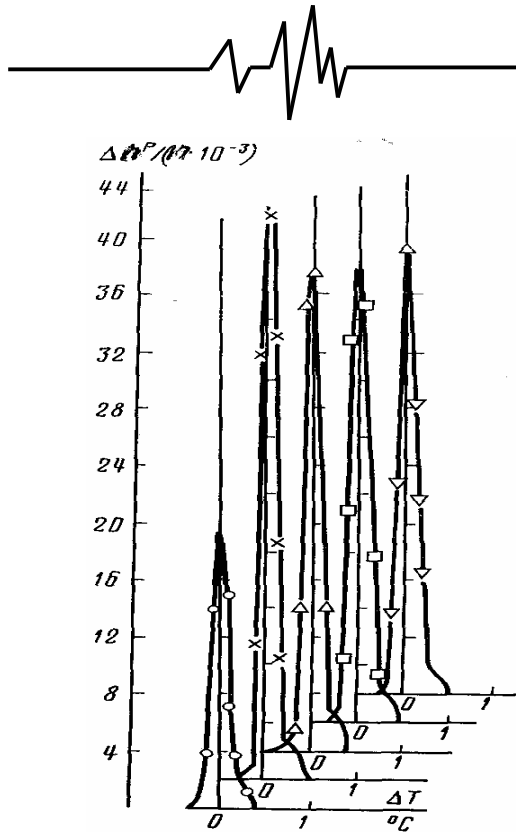


Рис.6. Розподіл щільності ймовірності пульсації в області пари

Ураховуючи перевагу ряду наявних вимірів температури, можна визначити температури, які відповідають основній канонічній функції зміни температури в перегрітому шарі.

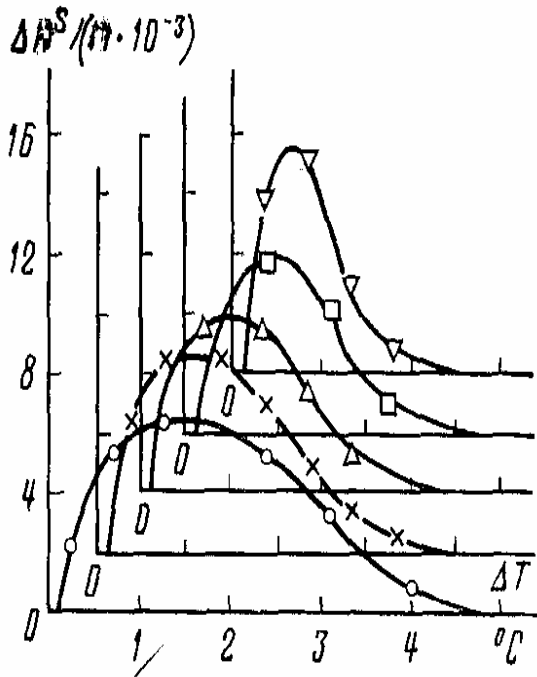


Рис.7. Розподіл щільності ймовірності пульсації температури в перегрітому рідкому шарі

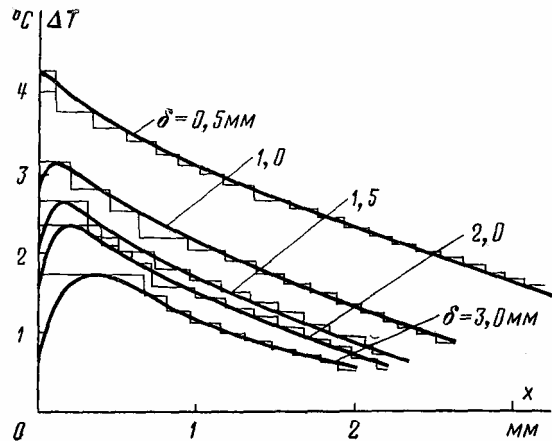


Рис.8. Розподіл температури в залежності від відстані до границі розділу фаз

Такий аналіз виконаний для температурних пульсацій при тепловому потоці 250000 Вт/м². На рис.8 наведені розподіли температур для цього теплового потоку. Отримані результати підтверджують наше допущення про канонічний характер пульсації температури в перегрітому рідкому шарі. Варто зауважити, що отриманий розподіл відповідає розподілу температури тільки далеко від границі розділу фаз рідина – пара. Навіть, з урахуванням недоліків розглянутого методу, розподіл температур в рідкому пограничному шарі представляє собою статистично осереднене розподілення температури, експериментально отримане за умов, які відповідають реальному процесу.

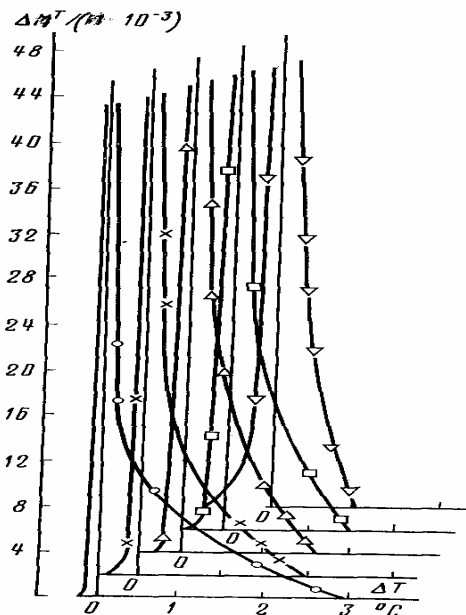


Рис.9. Розподіл щільності ймовірності пульсації температури в області рідини на різній відстані від грюючої стінки

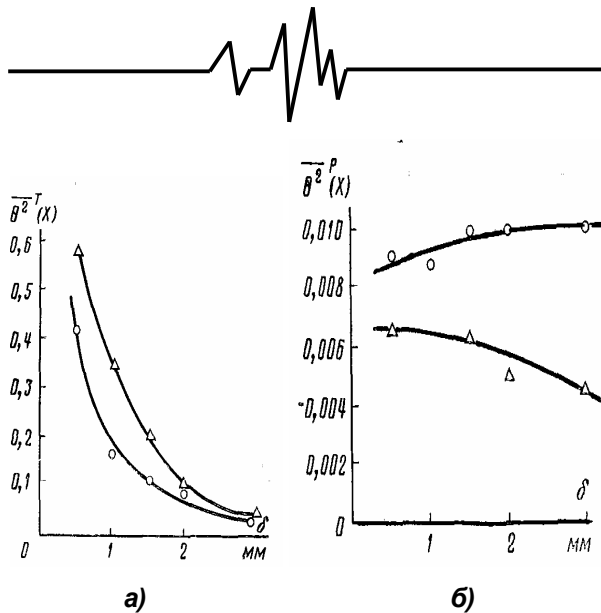


Рис.10. Зміни $\overline{\theta^2}^P$ (а) і $\overline{\theta^2}^T$ (б) в залежності від відстані до гріючої стінки при тепловому потоці: Δ – 197300 і \circ – 257300 Вт/м²

На рис.9 наведено розподіл щільності ймовірності пульсацій температури в області, яка оточує парову бульбашку для п'яти різних відстаней від гріючої стінки. Можна бачити, що крива розподілу щільності ймовірності змінює свою форму при зміні відстані від стінки. Особливо кидається у вічі, що більш високі моменти імпульсу відрізняються для кожного розподілу в залежності від відстані до гріючої стінки. Ймовірно, це залежить від інтенсивності турбулентності на різних відстанях від стінки.

З точки зору вивчення теплообміну зміна основної різниці температур між окремими підсистемами, яка залежить від відстані до гріючої стінки, викликає великий інтерес. На

рис.10 наводиться зміна $\overline{\theta^2}^P$ і $\overline{\theta^2}^T$ в

залежності від відстані до гріючої стінки. Як було сказано раніше, значення $\overline{\theta^2}^P$ дуже мале в порівнянні з відповідним значенням $\overline{\theta^2}^T$.

Крім цього, $\overline{\theta^2}^P$ приймає постійне значення на всіх відстанях від стінки, тоді як $\overline{\theta^2}^T$ змінюється в залежності від відстані. Це також стверджує, як і слід було чекати, що інтенсивність турбулентності залежить від відстані до стінки.

Висновок. Зроблена спроба аналізу пульсацій температури при кипінні з допущенням, що кипіння в великому об'ємі представляє собою явище переміжності з дискретними підсистемами. Показано, що критерії, прийняті для визначення індивідуальної функції, дозволяють отримати відтворюванні результати, які відповідають прийнятій методиці.

Література

1. Афган Н., Йович Л. Анализ флуктуаций перегрева жидкости при кипении на основе условного квантового сигнала.– Препринт ин-та тепло- и массообмена АН БССР.– Минск, 1976.– 16 с.
2. Йованович А., Афган Н. Пульсации температуры при кипении в условиях вынужденной конвекции.– В кн.: Тепло- и массоперенос. Минск: Наука и техника, 1972, т.9, ч.1.– С. 177–195.
3. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении.– К.: Наукова думка, 1980.– 316 с.