

Кулінченко В. Р.

Дубковецький І. В.

Деменюк О. М.

**Національний
університет
харчових
технологій**

УДК 621.1.013

ПУЛЬСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕРЕГРІТІЙ РІДИНІ

Выполнен статистический анализ вероятных пульсаций параметров, которые характеризуют распределение температуры в пограничном слое между паровой и жидкой фазой. На экспериментальной установке выполнена проверка на адекватность принятых допущений на процесс пульсации температуры в тепловом пограничном слое.

A statistical analysis of parameters' probable pulsations that characterise the temperature distribution between vapour and liquid phase has been presented. During experimentation the adequacy of suggestion concerning the pulsation of temperature within a thermal boundary layer has been estimated.

Пульсації змінних величин в пограничному шарі багато в чому залежать від процесу переносу, що відбувається всередині шару. Дослідження статистичних характеристик цих пульсацій є одною з основних проблем при вивченні механізму розглядуваного процесу переносу. Статистичний метод аналізу пульсації фізичних параметрів показує, що в тепловому пограничному шарі існує певна кореляція між полями різних змінних величин, які залежать від механізму процесу переносу.

Процес конвективного переносу теплоти є типовим процесом, який характеризується взаємною залежністю поля температур і швидкості. Якщо процес переносу теплоти в тепловому пограничному шарі залежить від пульсацій температури і швидкості, то знання статистичних характеристик пульсацій температури і швидкості дозволяє зрозуміти механізм переносу, який визначає теплообмін в пограничному шарі.

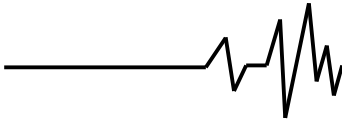
Кипіння представляє собою процес теплообміну, який характеризується однією додатковою змінною на відміну від конвективного теплообміну без кипіння. Це значить, що крім температури і швидкості на перенос теплоти в пограничному шарі чинить вплив зміна густини. Відомо, що багато типових характеристик кипіння, таких як діаметр відриву бульбашки, її частота генерації, шорсткість поверхні і крайовий кут змочування мають статистичну природу. Оскільки перелічені параметри залежать від зміни густини, названа зміна також носить статистичний характер. Пульсації густини в великому ступені зв'язані з

пульсацією температури і швидкості в двофазному пограничному шарі, що обумовлено нерівноважним станом рідини поблизу гріючої стінки.

Існуючі уявлення про статистичну природу змінних величин в двофазному пограничному шарі вкрай обмежені. Очевидно, що використання статистичного методу стосовно до аналізу пульсацій змінних величин в двофазному пограничному шарі вимагають грубих припущень для інтерпретації отриманих результатів дослідів. Оскільки ця робота є одною з перших, де розглядається підхід до вирішення проблеми визначення статистичних характеристик пульсаційних змінних в двофазному пограничному шарі, то вибір змінної для аналізу необхідно зробити у відповідності з важливістю вибраної величини, яка впливає на теплообмін при кипінні.

Відомо, що температура рідини в двофазній системі є однією з найбільш важливих змінних, яка впливає на інтенсивність теплообміну біля гріючої стінки. Крім цього, різниця температур між рідинною і паровою фазами є тим параметром, який визначає відхилення нерівноважного стану системи від стану рівноваги. З цієї точки зору за основну змінну для статистичного аналізу доцільно вибирати температуру рідини. Для спрощення умов аналізу, спочатку виконано дослідження процесу кипіння у великому об'ємі.

Було зроблено декілька спроб [1] аналізу пульсацій температури при кипінні в великому об'ємі. Але в деяких спробах виконувався аналіз гістограм для опису зміни температури



поблизу гриючої стінки, були також виконані спроби [3] отримати розподіл середньої температури біля одиночного центру генерації парової фази. Виходячи зі сказаного, вивчення пульсацій температури дозволяє отримати інформацію про інтенсивність самого процесу кипіння.

На підставі досліджень можна стверджувати, що пульсації температури у двофазному пограничному шарі обумовлені наступними факторами.

1. Переміщення гарячого спаю мікротермопар через границю розділу рідина – пара викликає зміну температурного сигналу термопар. У першому наближенні таку зміну температури можна розглядати як ступінчасту зміну часової координати. Це значить, що рідина знаходиться при тій самій температурі, яка відповідає перегріву рідини, а температура пари дорівнює температурі насичення при тиску в системі. Такий тип зміни пульсацій температури можна розглядати як регулярну хвилю прямокутного профілю з частотою, що відповідає частоті зміни паровмісту в будь-якій фіксованій точці системи. Амплітуда хвилі прямокутного профілю дорівнює найбільш ймовірній різниці температур між рідиною і паровою фазами. Вважаючи, що хвиля прямокутного профілю коливається з амплітудою T , яка відповідає зміні сигналу гарячого спаю термопар, що проходить крізь рідину. Нульова амплітуда відповідає сигналу термопар в момент, коли її гарячий спай знаходиться в парі.

2. Внаслідок статистичного характеру багатьох параметрів, що впливають на процес кипіння, в пограничному шарі відбувається активне перемішування двофазної суміші. Інтенсивність процесу пароутворення, що залежить від перегріву рідини, також визначається неврахованими статистичними характеристиками параметрів, які впливають на процес кипіння. Все це викликає пульсацію температури у кожній фазі. Тому що існує багато невідомих параметрів, які впливають на пульсації температури в рідині і її пари, в якості першого наближення можна прийняти, що пульсації температури в рідкій і паровій фазах є випадковою змінною величиною.

Основні причини, які викликають пульсації температури в двофазному пограничному шарі, можна віднести на рахунок пульсацій прямокутного сигналу, який є результатом зміни паровмісту в будь-якій фіксованій точці системи і випадкових пульсацій, які залежать від багатьох невідомих величин. Враховуючи, що індивідуальні параметри двофазного пограничного шару

залежать від багатьох параметрів, можна вважати, що вони визначають перенесення теплоти, маси і кількості руху, і носять статистичний характер. Вважаючи, що характер пульсацій температури в двофазному пограничному шарі відповідають описаному вище, виконати аналіз цих пульсацій можна здійснити на підставі наступних припущень.

1. Результуючі зміни температури в будь-якій фіксованій у просторі точці двофазного пограничного шару можна розділити на дві незалежні флуктуаційні функції. Одна з них представляє собою функцію прямокутного сигналу, обумовлену зміною паровмісту, а друга – випадкову флуктуацію температури рідини і пари.

2. Результати розподілу щільності ймовірності випадкових пульсацій температури є сумою двох складових, які відповідають пульсаціям температури в рідкій і паровій фазах. Це значить, що функцію пульсації температури в часі $T(\tau)$ можна представити як суму випадкової змінної $X(\tau)$ і функції прямокутного сигналу $Y(\tau)$:

$$T(\tau) = X(\tau) + Y(\tau).$$

Щоб визначити функцію прямокутного сигналу $Y(\tau)$, яка описує зміну паровмісту в довільній точці системи, необхідно прийняти, що розподіл ймовірності періоду сигналу визначається розподілом ймовірності за законом Пуассона. У відповідності з допущеннями, зробленими нами, амплітуда прямокутного сигналу дорівнює середній різниці температур між рідиною і її паром. З урахуванням цього маємо:

$$Y(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{n+\infty} \frac{\Delta T b}{\tau_1} \frac{\sin n\pi(b/\tau_r)}{n\pi(b/\tau_r)} \exp \left[j n w_r \left(\tau_r - \frac{b}{2} \right) \right],$$

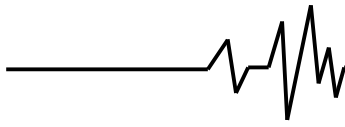
де b – частина періоду, що відповідає рідкій фазі; τ_r – період прямокутного сигналу; w_r – швидкість росту парової фази; j – комплексна змінна, середнє значення якої становить:

$$\overline{Y(\tau)} = \Delta T \frac{b}{\tau_r} \quad \text{чи} \quad Y(\tau)^2 = \left(\Delta T \frac{b}{\tau_r} \right)^2.$$

При цьому дисперсія прямокутного сигналу буде

$$\sigma_y^2 = \overline{Y(\tau)^2} - [\overline{Y(\tau)}]^2.$$

У відповідності з другим припущенням можемо записати, що розподіл щільності ймовірності випадкової змінної становить



$$P(X) = (2\pi\sigma_x)^{-1} \exp\left(-\frac{X^2}{2\sigma_x}\right),$$

вважаючи, що середнє значення пульсаційної змінної дорівнює нулю.

У випадку, що розглядається вибіркові значення випадкової змінної для рідини і пари є двома складовими тих самих функцій, оскільки вважається, що пульсації температур в рідині носять теж випадковий характер, але з тією різницею, що їх середнє значення змінюється в порівнянні з середнім значенням пульсацій в парі для постійної величини ΔT , яка відповідає амплітуді прямокутного сигналу. Розподіл щільності ймовірності змінної отримано шляхом додавання розподілу щільності для рідкої і парової фаз на підставі амплітудного аналізу пульсацій температури в двофазному потоці.

Оскільки вважаються, що X і Y є незалежними змінними, дисперсія їх суми дорівнює сумі їх дисперсій. Отже, маємо:

$$\sigma_T^2 = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2.$$

Середнє квадратичне значення пульсацій температури можна отримати з функції спектральної щільності енергії

$$\int_0^\infty Z(f) df = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2,$$

де Z – спектральна щільність енергії; f – частота пульсацій.

Для перевірки на адекватність прийнятого в даному аналізі припущення необхідно виконати заміри пульсацій температури біля гріючої стінки при кипінні рідини.

Експериментальне визначення пульсацій температури в двофазному киплячому пограничному шарі виконано за допомогою мікротермопарного зонду. Аналіз пульсацій температури в двофазній системі рідина – пара показує що ці пульсаційні явища можна розглядати як випадкові змінні, які носять ймовірний характер. Вважається, що температурні пульсації представляють собою стаціонарні випадкові величини, для яких характерна властивість ергодичності. Таке допущення значить, що середнє значення в часі дорівнює середньому значенню за координатою. Це допущення перевірене експериментально. Дослідне підтвердження властивості ергодичності температурних пульсацій отримано при стаціонарних умовах досліджуваної системи. Це досягалося шляхом вимірювання середнього значення сигналу для

того, щоб переконатися чи не змінюється величина в процесі експерименту.

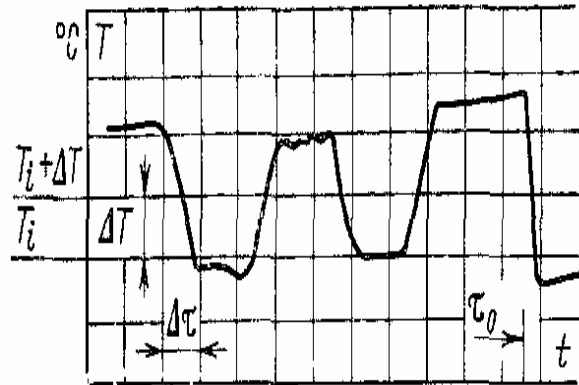


Рис.1. Типова осцилограма температурних пульсацій

Відомо, що будь-яка випадкова величина має статистичний характер. Таким чином, ця величина може бути описана за допомогою статистичних параметрів. Названі параметри можна розділити на дві групи, перша з яких описує розподіл щільності ймовірності амплітуди, а друга – функцію спектральної щільності енергії. Типовий сигнал пульсацій температури в двофазному пограничному шарі наведено на рис.1. Для амплітудного аналізу температурних пульсацій вибіркові значення температури розділимо на m значень ΔT , а вибіркові значення часу τ_0 – на n значень $\Delta \tau$. Тоді ймовірність знаходження амплітуди $T(\tau)$ в інтервалах T_i і $T_i + \Delta T$ становить:

$$P(T_i, T_i + \Delta T) = \frac{\sum_i \Delta \tau}{\tau_0}$$

чи

$$T(T_i, T_i + \Delta T) = \frac{\Delta n_i}{n},$$

де Δn_i представляє ряд значень ΔT_i з амплітудою T_i у вибірковому значенні T_0 . Вважаючи, що ΔT_i дуже мала величина, функцію щільності ймовірності можна записати таким чином:

$$P(T_i) = \frac{T(T_i, T_i + \Delta T)}{\Delta T}.$$

Для експериментального визначення розподілу ймовірності сигналу мікротермопар використовували електронну блок-схему (рис.2).

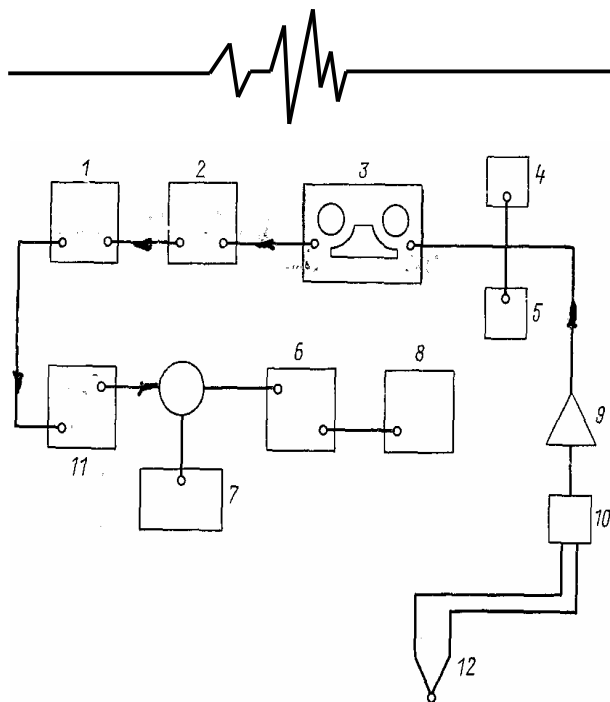


Рис.2. Блок-схема для визначення температурних пульсацій під час кипіння рідин: 1 – компаратор; 2 – підсилювач; 3 – магнітофон; 4 – цифровий вольтметр; 5 – осцилограф; 6 – двійковий регістр; 7 – генератор часових відміток; 8 – ЕОМ; 9 – підсилювач; 10 – компаратор; 11 – перетворювач напруги в частоту; 12 – мікро термопарний зонд

Установка для реєстрації сигналу і електронна схема його аналізу складалася з наступних елементів: двох компараторів, двох підсилювачів, цифрового вольтметра, осцилографа, магнітофона, перетворювача напруги в частоту, двійкового регістру, генератора часових міток і ЕОМ. Для того щоб виключити постійну складову е.р.с. температури, реєстрований сигнал мікротермопарни подавався на компаратор, а змінна складова сигналу подавалася на вхід підсилювача постійного струму. Підсилювач постійного струму мав нульовий дрейф і дозволяв виконувати виміри в діапазоні частот аж до 10 кГц при максимальному підсиленні сигналу в 1000 разів. Для безперервного контролю постійної складової сигналу використовувався цифровий вольтметр. Контроль змінної складової сигналу здійснювався на екрані осцилографа, а далі сигнал записувався на стрічку магнітофона. Вимірювальний магнітофон використовувався як проміжний елемент ланцюга для запису сигналу, який подавався на електронну частину схеми, за допомогою якої виконувався аналіз сигналу. При необхідності сигнал з магнітофона можна було знову підсилити і подати на вхід компаратора для перетворення в напругу за

допомогою перетворювача частоти, далі сигнал перетворювався в модуляторі і пропускався через i -схему, контроль за якою здійснювався за допомогою імпульсного генератора з частотою 250 Гц. Після цього сигнал направлявся на двійковий регістр, де він кодувався для подачі на ЕОМ.

Сигнал мікротермопарни, яка знаходилася на різних відстанях від гріючої стінки, записувався на магнітну стрічку зі швидкістю 38,1 см/с на протязі приблизно 6 с. При амплітудному аналізі швидкість відтворення сигналів магнітної стрічки збільшувалася в 16 разів і подавався на перетворювач зі швидкістю 250 сигналів за секунду. Таким чином, дійсна швидкість запису становила 4000 сигналів за секунду. Реальна тривалість одного дискретного сигналу становила 30 с при загальній кількості дискретних значень амплітуд, використовуваних для аналізу, рівному 120000. При амплітудному аналізі програмою розрахунків передбачався вибір значень амплітуд $T_i + \Delta T$ з кроком від $i = 1$ до $i = 1000$ для ряду дискретних значень p_i для будь-якої різниці амплітуд $T_{i+1} - T_i$ в межах вибраного інтервалу дискретних значень, рівного $p_0 = 120000$. Типовий розподіл ймовірності амплітуди під час кипіння води на горизонтальній поверхні нагріву в великому об'ємі наведено на рис.3.

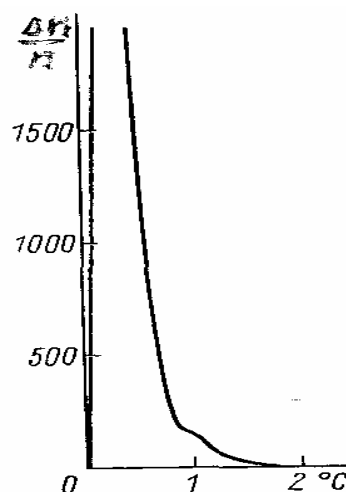


Рис.3. Типовий розподіл температурних пульсацій при кипінні води при тепловому потоці $q = 122000 \text{ Вт/м}^2$, тиску $p = 0,1 \text{ МПа}$ на відстані $\delta = 5,5 \text{ мм}$ від гріючої стінки

При частотному аналізі сигналу мікротермопарни використовувалося два методи. Перший ґрунтується на застосуванні установки, блок-схема якої наведена на рис.4.

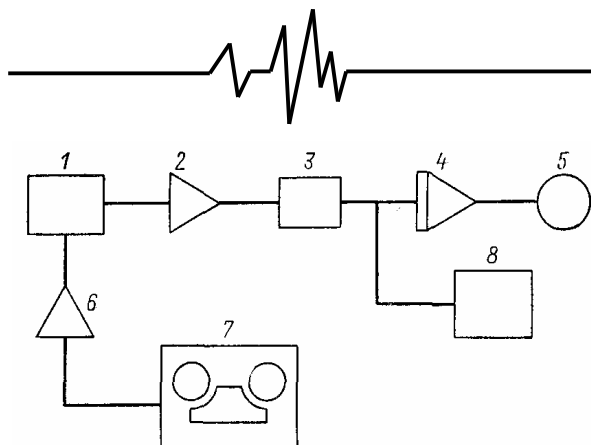


Рис.4. Блок-схема для аналізу температурних пульсацій: 1 – вузько смуговий фільтр; 2 – підсилювач; 3 – помножувач; 4 – інтегратор; 5 – цифровий вольтметр; 6 – підсилювач; 7 – магнітофон; 8 – генератор часових інтервалів

Сигнал з магнітофонної стрічки пропускався через фільтр з певною частотою проходження Δf . Після фільтру сигнал подавався на підсилювач і помножувач для підведення до квадрату миттєвих значень сигналу, що пройшов фільтр. Осереднення цього миттєвого значення за інтервал запису сигналу здійснювався за допомогою інтегратора і генератора часових інтервалів.

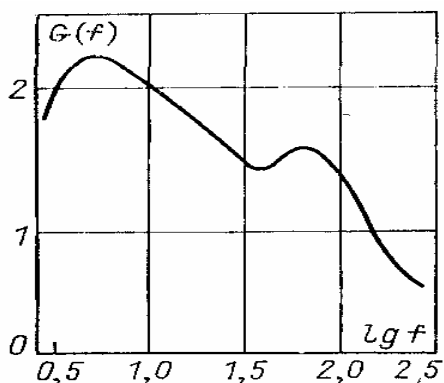


Рис.5. Типова функція спектральної щільності енергії температурних пульсацій під час кипіння води при тепловому потоці $q = 122000 \text{ Вт/м}^2$, тиску $p = 0,1 \text{ МПа}$ на відстані $\delta = 5,5 \text{ мм}$ від гріючої стінки

Отримане, за допомогою цього методу, середньоквадратичне значення сигналу для частоти $f_i + \Delta f$ повторювалося для всього діапазону частот від 3 до 200 Гц. Типова функція спектральної щільності енергії наведена на рис.5, для такої ж тривалості кожного вибіркового значення сигналу, яка використовувалася при амплітудному аналізі за допомогою установки, що наведена на рис.4.

Другий метод використовували при частотному аналізі, який ґрунтується на використанні програми розрахунку автокореляційної функції.

Вимірювання пульсацій температури виконано при кипінні води на горизонтальній і вертикальній поверхні при атмосферному тиску в великому об'ємі. Пульсації температур вимірювались для декількох точок, які відповідають різним положенням гарячого спаю термопар від гріючої поверхні.

Аналіз пульсацій температур при кипінні в великому об'ємі на горизонтальній поверхні був проведений на воді, етанолі і цукрових розчинах.

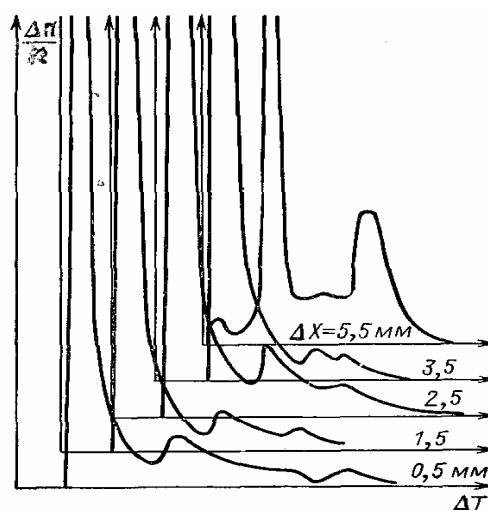
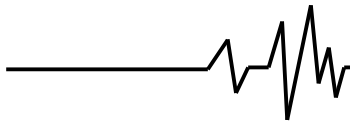


Рис.6. Розподіл ймовірності амплітуди температурних пульсацій на різних відстанях від гріючої стінки при кипінні води при тепловому потоці 86500 Вт/м^2

На рис.6 наведено розподіл щільності ймовірності пульсацій температури для різних положень гарячого спаю відносно гріючої поверхні при кипінні води за атмосферного тиску і тепловому потоці 86500 Вт/м^2 . Пульсації температур вимірювалися для п'яти різних положень мікротермопар: $\Delta X = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 5,5 \text{ мм}$. Процес кипіння при розглядуваних умовах відбувався в режимі одиночних бульбашок. Положення гарячого спаю вибиралося так, щоб спай знаходився над центром утворення парової фази.

З амплітудного розподілу видно наявність трьох піків на кривій розподілу для будь-якого положення гарячого спаю. Перший пік відповідає температурі насиченої пари, а другий і третій – різним значенням перегріву рідини. Нижнє значення відповідає перегріву рідини, яка знаходиться на однаковій відстані від границі рідина – пара, а верхнє значення



відтворює перегрів рідини в тепловому пограничному шарі, яким охоплена бульбашка. Перегрів оточуючої рідини приймає постійне значення в усіх точках виміру, а перегрів рідини в тепловому пограничному шарі змінюється зі зміною відстані від гріючої поверхні, що було виявлено при аналізі температурного поля за допомогою швидкісної кінозйомки.

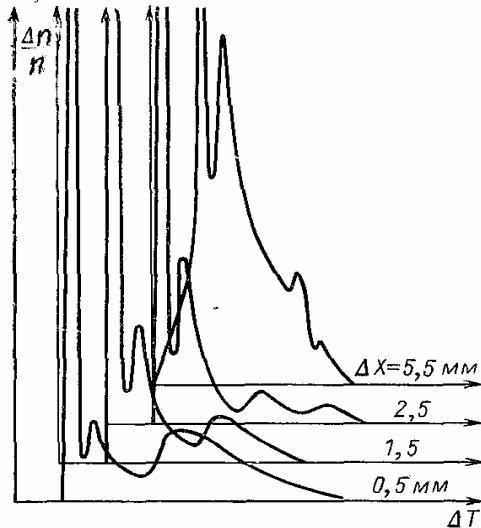


Рис.7. Розподіл ймовірності амплітуди температурних пульсацій на різних відстанях від гріючої стінки при кипінні води при тепловому потоці 277500 Вт/м²

На рис.7 наведені результати, отримані при тепловому потоці 277000 Вт/м², що відповідає розвиненому бульбашковому режимі кипіння. В принципі, не існує різниці між результатами, отриманими при низьких і високих теплових потоках, оскільки при високих теплових потоках спостерігається аналогічний характер розподілу щільності ймовірності. У цьому випадку максимальний перегрів рідини має таку саму функцію розподілу для різних відстаней від поверхні нагріву, як і при низьких теплових потоках.

На рис.8 показана залежність максимального перегріву рідини при кипінні від відстані до гріючої стінки для трьох значень теплових потоків. З рис.9 видно, що на відстані більшій, ніж $\Delta X = 2$ мм, немає різниці в значенні максимального перегріву при різних теплових потоках. Але в цих вимірах не достатня чутливість термопари, щоб слідувати за температурними пульсаціями в тепловому пограничному шарі на відстанях менших, ніж $\Delta X = 2$ мм. Отже, чим більший тепловий потік на відстані меншій 2 мм, тим більша різниця між вимірами значень перегріву з дійсним його значенням.

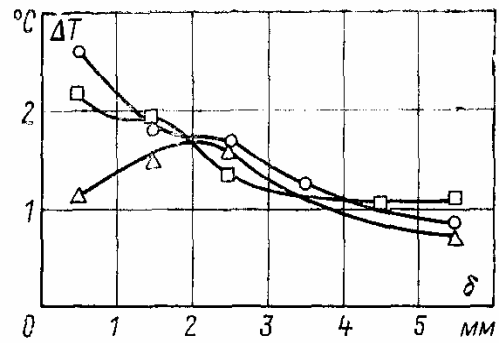


Рис.8. Залежність максимального перегріву рідини від відстані до поверхні нагріву: ○ – 88600; □ – 126000; Δ – 279900 Вт/м²

Це підтверджується дослідями на в'язких цукрових розчинах з високим вмістом цукрози, а тим більше на утфелях (суспензія міжкристалного розчину з кристалами цукру). Це є наслідком зменшення товщини теплового пограничного шару, який оточує парову бульбашку (що не в повній мірі відповідає суспензіям), і термопара, яка проходить крізь шар немає часу щоб "приспособитися" до швидкоплинного процесу в цьому шарі.

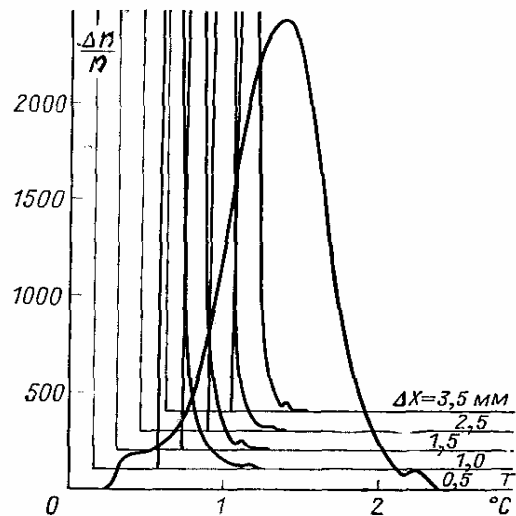
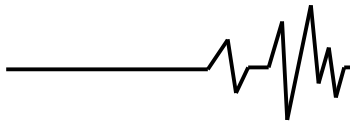


Рис.9. Розподіл ймовірності амплітуди пульсації температури на різних відстанях від гріючої стінки при кипінні етанолу при $q = 90000$ Вт/м² і тиску 0,05 МПа

На рис.9 і 10 наведені результати розподілу ймовірності температурних пульсацій у двофазному пограничному шарі при кипінні етанолу на горизонтальній поверхні. На рис.9 наведені результати розподілу ймовірності амплітуди для теплового потоку 90000 Вт/м², а



на рис.10 для $q = 180000 \text{ Вт/м}^2$. Необхідно відмітити, що ці виміри проводилися при тиску меншому за атмосферний тиск, при цьому бульбашки були дуже малі в порівнянні з розмірами термопарного зонду.

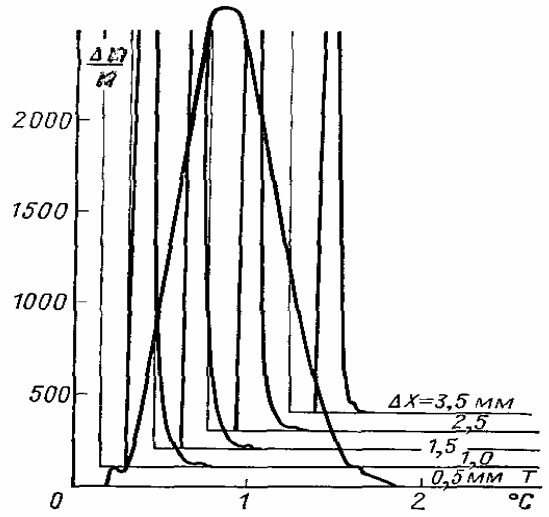


Рис.10. Розподіл ймовірності амплітуди пульсації температури на різних відстанях від гріючої стінки при кипінні етанолу при $q = 180000 \text{ Вт/м}^2$ і тиску $0,05 \text{ МПа}$

На рис.11 наведено значення перегріву рідини навколо бульбашки, в залежності від відстані до стінки, де перегрівається рідина до показників перегрітого шару навколо парової бульбашки.

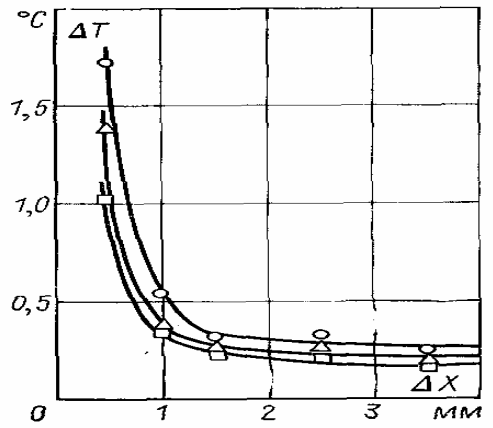


Рис.11. Перегрів етанолу при кипінні в великому об'єму в залежності від відстані до гріючої стінки: ○ – тепловий потік 90000 ; Δ – 180000 ; ■ – 205000 Вт/м^2

На цьому ж рисунку наведені результати отримані для перегріву рідини в тепловому пограничному шарі, який оточує парову

бульбашку. З цього рисунку видно також, що при збільшенні теплового потоку на гріючій поверхні товщина теплового пограничного шару зменшується. Це є результатом збільшення турбулентності біля гріючої стінки. Крім цього, отримані результати показують, що збільшення теплового потоку веде до швидкого зменшення температури в пограничному шарі, який оточує бульбашку, при збільшенні відстані від гріючої стінки. Такий висновок погоджується з результатами, отриманими при кипінні води.

Дослідження пульсацій температур при кипінні в умовах вимушеного руху виконане на контурі високого тиску [2]. Термопара, яка використовувалася в цих експериментах, виготовлена з хромель-алюмелевого дроту діаметром 50 мкм . У досліді використовувалася кільцева робоча ділянка, внутрішня труба якої нагрівалася постійним електричним струмом. Досліди виконувалися для двох різних режимів двофазного потоку: один відповідав бульбашковому, а другий – плівковому режимам течії.

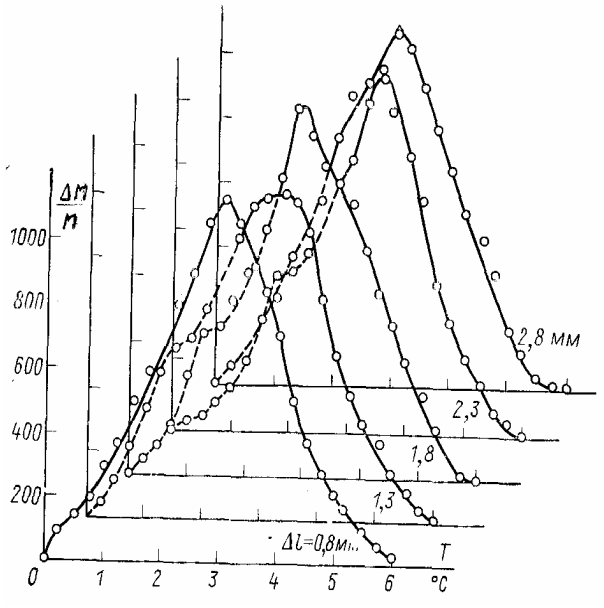
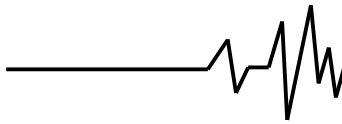


Рис.12. Розподіл ймовірності амплітуди температурних пульсацій при кипінні в умовах вимушеної течії при масових витратах $G = 0,16 \text{ кг/с}$, $p = 0,14 \text{ МПа}$, $q = 274000 \text{ Вт/м}^2$, $X_{ex} = 0,83\%$, бульбашковий режим течії

На рис.12 наведено розподіл ймовірності температурних пульсацій за бульбашкового режиму течії для різних відстаней від гріючої стінки. На рис.13 подані аналогічні наслідки для плівкової течії. Різниця в характері розподілу



ймовірностей для досліджуваних режимів течії показує, що кожен режим течії має свій характерний розподіл ймовірності температури в двофазному потоці.

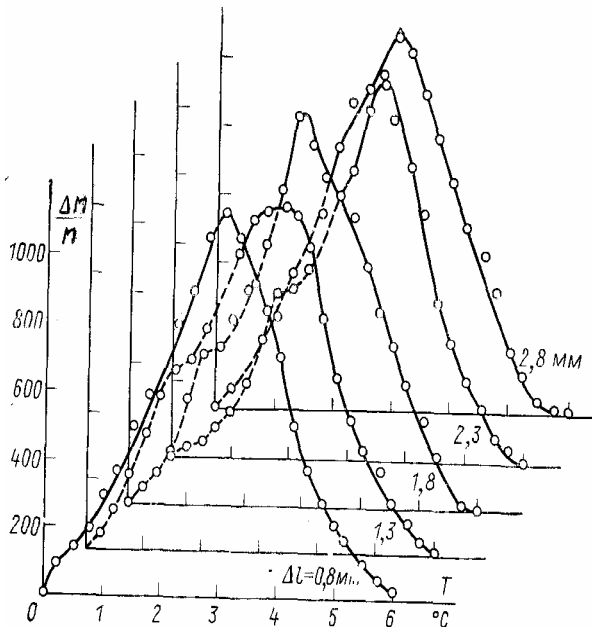


Рис.13. Розподіл ймовірності амплітуди температурних пульсацій при кипінні в умовах вимушеної течії при масових витратах $G = 0,16$ кг/с, $p = 0,18$ МПа, $q = 300000$ Вт/м², $X_{вх} = 8,53\%$, плівковий режим течії

Для перевірки існування режимів течії для кожного випадку виконувалися виміри коефіцієнту тепловіддачі з гріючої поверхні. Показано, що кожному режиму течії,

виявленому на основі вимірів пульсацій температури, відповідає певна інтенсивність теплообміну, якій відповідає паровміст системи. Варто зауважити, що це твердження справедливе тільки для бульбашкового режиму течії, при якому згладжуються піки на кривій розподілу ймовірності, які відповідають температурі відповідно рідкої і парової фаз. Разом з тим можна стверджувати, що при використанні адекватного методу умовних виборок, зміну пульсацій температури можна використати для визначення місцевого паровмісту для будь-якого режиму двофазного потоку.

Висновок. Припущення стосовно ергодичності, використане нами під час аналізу пульсацій в двофазній системі, необхідно розглядати тільки як перше наближення і його треба ретельно перевірити перед тим, як широко використовувати для аналізу різних типів двофазних систем.

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.