

### **Температурне поле навколо парової бульбашки** **The temperature field is round steam bubble**

*На підставі вибраної методики дослідження температурного поля навколо парової бульбашки під час її росту, розроблений мікротермопарний зонд і виконано динамічне його градування. Отримані дослідні дані перевірені з розрахунковими по різних моделям росту парової фази.*

**Ключові слова:** температурне поле, парова бульбашка, термопарний зонд, динамічне градування, фаза, теплообмін.

*Based upon the chosen method of the temperature field surrounding a vapor bubble study during its grows, a microthermocouple probe, has been done. The obtained experimental data have been compared with that calculated within different models of the vapor phase grows.*

**Keywords:** temperature field , vapor bubble, thermocouple probe, dynamic calibration, phase, heat transfer.

*На основани вибранної методики исследования температурного поля вокруг парового пузырька во время его роста, разработан зонд микротермопары и выполнено динамическое его градуирование. Получены опытные данные проверенные с расчетными по разным моделям роста паровой фазы.*

**Ключевые слова:** температурное поле, паровой пузырек, зонд термопары, динамическое градуирование, фаза, теплообмен.

Дослідження температурного поля навколо зростаючої парової бульбашки повинно бути одним із головних напрямків для пояснення механізму переносу теплоти в процесі генерації парової фази. Для перевірки справедливості існуючих аналітичних моделей, які описують механізм теплопереносу біля границі розділу рідина–пара, необхідно дослідним шляхом визначити температурне поле навколо бульбашки під час її росту. Існує три методологічних підходи до вирішення цього питання.

Перший метод ґрунтується на використанні оптичних досліджень двофазного потоку. Для візуалізації досліджень використовується безпосередньо пропускання світла, тіньовий метод і інтерференційний. Під час роботи ці методи відрізняються один від іншого оптичною довжиною пучка світла. Оскільки тепловий пограничний шар являє собою область з сильною зміною градієнта густини, викликану градієнтом температури, візуалізацію процесу можна здійснювати, використовуючи тіньовий метод вимірювання (шлірен-метод). Не дивлячись на те, що цей метод має великі переваги для якісної картини процесу, його точність для кількісних вимірів обмежена. Основні джерела помилок обумовлені довжиною хвилі світла, оптичним відхиленням від кривизни границі розділу, температурним градієнтом в досліджуваній області, а також відбиттям світла при проходженні різних середовищ від джерела до камери. Перераховані недоліки не дають можливості використовувати цей метод для кількісного виміру в тепловому пограничному шарі парової бульбашки.

Другий метод передбачає використання мікротермопар для визначення температури навколо парової бульбашки під час її росту. Аналіз виконаних дослідження [3] у двофазному пограничному шарі з використанням цього методу не дозволив отримати достовірні результати. В цих дослідах виявлено суттєву пульсацію температури біля поверхні теплообміну. Зазвичай показники мікротермопар синхронізуються зі швидкісною кінокамерою для отримання фізичного зв'язку між сигналом гарячого спаю термопар і зростаючою паровою бульбашкою. Цей метод дозволяє визначити відношення між кількістю теплоти, яка передається перегрітою рідиною, що оточує бульбашку, до кількості теплоти,

що передається крізь шар, який прилягає до поверхні нагріву під бульбашкою. Дослідження виконані Субботіним з працівниками, показали, що існуючі аналітичні методи не відображають реальний характер теплопереносу під час росту парової бульбашки.

Третій метод оснований на вимірі температури поверхні нагрівання. Значні пульсації температури поверхні теплообміну пов'язані з випаровуванням рідкої плівки біля основи парової бульбашки під час її росту. Детальне вивчення мікрочару підтвердило, що ця модель найкраще описує ріст бульбашки при низьких тисках [2]. Для виміру температури поверхні використовуються термометри опору. Ці датчики мають достатньо малі розміри з малим значенням сталої часу (до  $10^{-8}$  с), що дозволяє вимірювати місцеві пульсації температури, не вносячи значних подразнень в тепловий потік і динаміку рідини.

Зупинимося на більш детально на другому методі. Виміри температурного поля навколо парової бульбашки [1] виконувалися за допомогою мікротермопар, виготовленої з хромель-алюмельового дроту діаметром 12,5 мкм. При вимірюванні температурного поля навколо бульбашки необхідно, щоб конструкція термопарного зонда відповідала таким вимогам: гарячий спай термопар повинен бути механічно міцним і мати малу інерційність; конструкція зонда не повинна вносити помітні зміни в динаміку потоку рідини. З урахуванням цих вимог розроблений і виготовлений мікрозонд (рис.1), в якому термопарні дроти знаходяться в скляних трубках діаметром 0,13 мм завдовжки 5 мм, частково вставлені в трубку з нержавіючої сталі діаметром 0,3 мм. Вільний кінець спаю виступає на 0,5 мм із скляної трубки. Таким чином забезпечена достатня жорсткість і мінімізація конструктивних розмірів зонда.

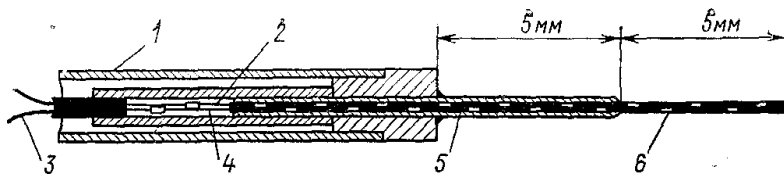


Рис.1. Мікротермопарний зонд: 1 – нержавіюча трубка  $\varnothing 1,6 \times 0,2$  мм; 2 – хромель  $\varnothing 12,5$  мкм; 3 – термопара хромель-алюмель  $\varnothing 0,5$  мм; 4 – алюмель  $\varnothing 12,5$  мкм; 5 – нержавіюча трубка  $\varnothing 0,3 \times 0,3$ ; 6 – скляна трубка  $\varnothing 0,13$  мм

Аналізуючи теплообмін між термопарою і оточуючою рідиною враховувався вплив на теплообмін від двох груп параметрів: таких, що характеризують теплообмін між поверхнею термопар і оточуючою рідиною і описуючих процес переносу теплоти між зовнішньою поверхнею термопар і її внутрішньою областю. Теплообмін між поверхнею і оточуючою рідиною визначається коефіцієнтом тепловіддачі, а другий процес залежить від форми і матеріалу термопар. Виходячи з таких міркувань передаточну функцію термопар  $L(S)$  можна розділити на дві складові частини –  $L_1(S)$  і  $L_2(S)$ :

$$L(S) = L_1(S)L_2(S),$$

де  $L_1(S) = \frac{\bar{T}_s}{\bar{T}_f}$ ;  $L_2(S) = \frac{\bar{T}_p}{\bar{T}_s}$ ,  $L$  – рідина,  $S$  – поверхня стінки,  $\bar{T}_p$ ,  $\bar{T}_s$ ,  $\bar{T}_f$  – перетворення

Лапласа при відповідних  $T_p$ ,  $T_s$ ,  $T_f$ , індекси стосуються:  $s$  – стінки,  $f$  – рідини,  $p$  – тиску.

Якщо вважати, що внеском  $L_2(S)$  в частотну характеристику можна знехтувати внаслідок малого розміру термопар і високого значення коефіцієнта теплопровідності матеріалу термопар, то температура поверхні пропорційна середній температурі термопар, тобто електрорушійній силі. У цьому випадку передаточна функція термопар для постійного коефіцієнта тепловіддачі становить:

$$L(S) = \frac{\bar{T}_s}{\bar{T}_f}, \text{ чи } L(S) = \frac{A}{A + S},$$

де стала величина  $A = \frac{\alpha S}{\rho c_p V}$  (в якій  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\rho$  – густина рідини,  $c_p$  –

теплоємність,  $V$  – об'єм бульбашки) визначається дослідним шляхом.

Суть динамічного градування зводиться до нагрівання термопарі від джерела теплового випромінювання і охолодженні її шляхом вимушеної конвекції. Це досягалося шляхом фокусування пучка світла на гарячому спаї термопарі з одночасним охолодженням її потоком газу. Температура гарячого спаю періодично змінювалася шляхом перекриття світлового пучка переривником із заданою частотою. Інтенсивність світлового пучка вимірювалася за допомогою фотодіода, який ставився за гарячим спаєм. Чутливість термопарі (рис.2) визначалася шляхом порівняння сигналу термопарі з сигналом фотодіода.

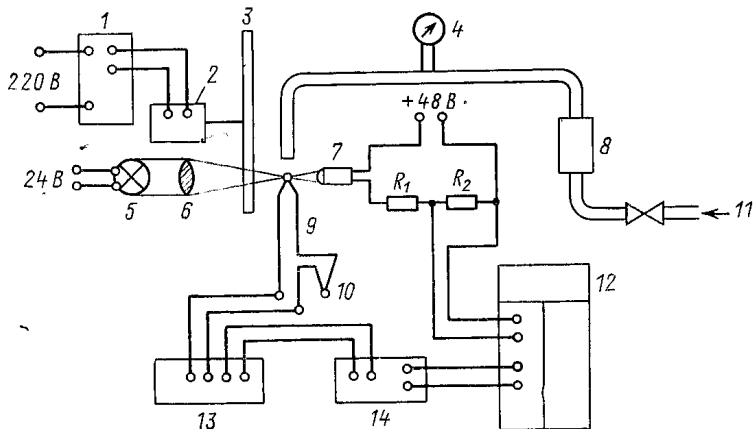


Рис.2. Установка для динамічного градування термопарі: 1 – автотрансформатор; 2 – двигун; 3 – переривник; 4 – манометр; 5 – лампа; 6 – об'єктив; 7 – фотодіод; 8 – витратомір; 9 – термопара; 10 – холодний спай; 11 – вхід газу; 12 – за поминальний осцилограф; 13 – компаратор; 14 – підсилювач

Старанний аналіз динамічних характеристик мікротермопарі, отриманих при різних швидкостях потоку газу, показав, що при однакових умовах теплообміну, які відповідають охолодженню термопарі у воді, чутливість повинна відповідати коефіцієнту тепловіддачі  $15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ . Динамічна характеристика термопарі наведена на рис.3, з якого видно, що для  $\alpha = 15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  і для термопарі діаметром  $12,5 \text{ мкм}$  верхня частотна межа становить біля  $300 \text{ Гц}$  при послабленні  $3 \text{ дБ}$ .

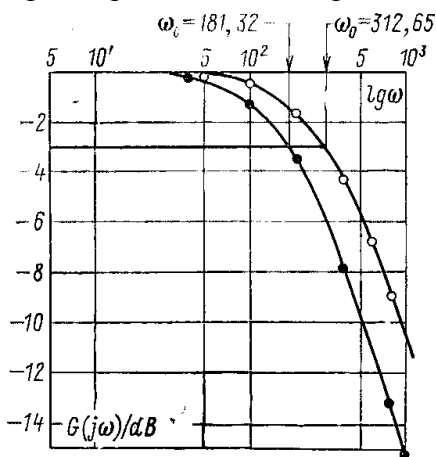


Рис.3. Передаточна функція мікротермопарі: ○ –  $q = 15000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$   $Q = 200 \text{ л}/\text{год}$ ; ● –  $11000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$   $Q = 400 \text{ л}/\text{год}$ .

Зміна температурного поля в киплячому пограничному шарі двофазного потоку на горизонтальній поверхні виконано на установці [1], схема якої наведена на рис.4. Тепловий потік підводився до чистої полірованої поверхні нагріву з нержавіючої сталі площею  $6 \text{ см}^2$  через мідний стрижень, припаяний сріблом до нижньої частини поверхні. На відстані  $30 \text{ мм}$  від припаяного кінця мідного стрижня на його поверхню намотувалася електрична спіраль потужністю  $1 \text{ кВт}$ . За довжиною мідного стрижня між нагрівачем і срібним припоєм ставилося п'ять термопар. Тепловий потік до поверхні нагріву визначався шляхом виміру температури за довжиною стрижня. Мікротермопарний зонд ставився на кришці посудини. Відстань між гарячим спаєм термопарі і поверхнею нагріву фіксувалася за допомогою мікрометричного гвинта. Цей пристрій дозволяв також переміщувати кришку, давало можливість установлювати гарячий спай в любую точку на поверхні теплообміну.

Взаємне розташування гарячого спаю термопарі і бульбашки під час її росту визначалось за допомогою швидкісної кінокамери "Нусам" з двома об'єктивами, обладнана відмітчиком часу. Один об'єктив фокусувався на гарячому спаї мікротермопарі для фотографування взаємозв'язку між двофазним пограничним шаром і гарячим спаєм, а другий – на екран осцилографа, на якому реєструвався сигнал термопарі.

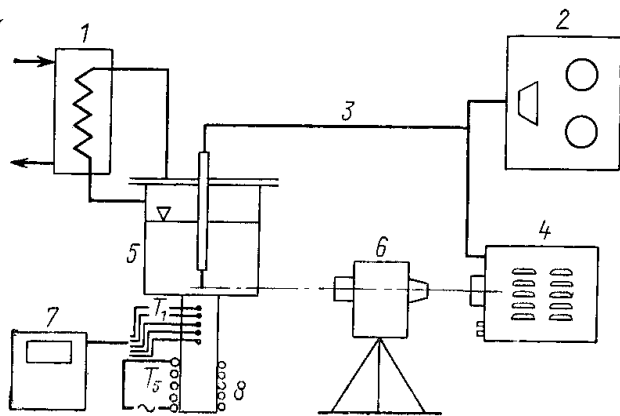


Рис.4. Дослідна установка для вимірювання пульсацій температури: 1 – конденсатор; 2 – магнітофон; 3 – мікротермопара; 4 – осцилограф; 5 – дослідна посудина; 6 – кінокамера; 7 – самописець; 8 – електронагрівач

Кінокадри, отримані при усталеному тепловому потоці на поверхні нагріву у постійному тиску в посудині, дозволили визначити температурне поле навколо парової бульбашки під час її росту.

На рис.5 показаний цикл кінокадрів з відмітками часу в період росту в воді типової парової бульбашки при тепловому потоці  $q = 178 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$  і відстані гарячого спаю від поверхні теплообміну  $X = 2,25 \text{ мм}$ .

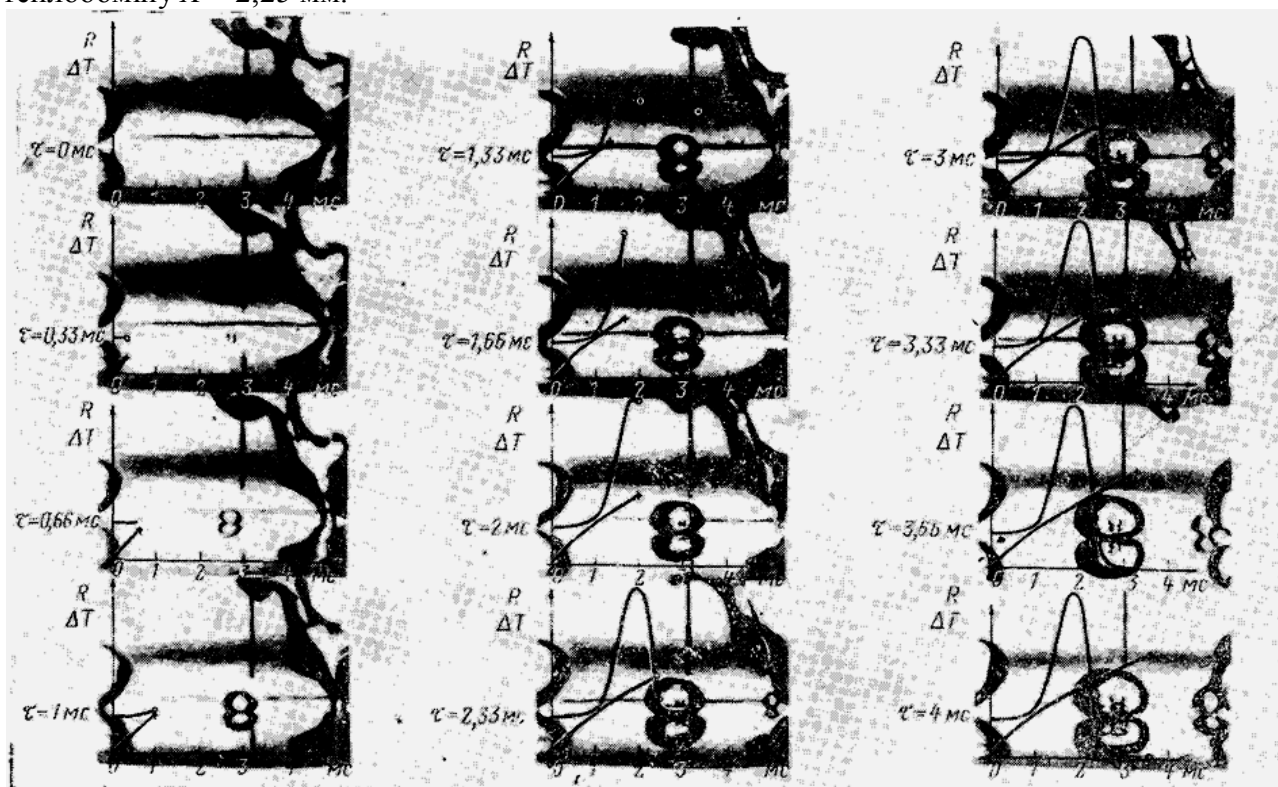


Рис.5. Ріст парової бульбашки при швидкості фотозйомки 4000 кадрів/секунду [1]

Послідовний ряд кінокадрів фіксує картину росту бульбашок і їх зв'язок з мікротермопарою. На кожному кадрі наведено сильно освітлений слід, який являє собою сигнал е. р. с. термопар. Лінії на фотографіях представляють зміну діаметра бульбашки і температури при фіксованому положенні гарячого спаю під час спостереження. З розгляду кінокадрів виходить, що навколо бульбашки існує шар перегрітої рідини. Для того щоб вивчити розвиток шару перегрітої рідини під час росту бульбашки було знято ряд кінострічок, які відповідають бульбашковому режиму кипіння на одиничних центрах пароутворення при певному значенні теплового потоку і при різних положеннях гарячого спаю термопар.

На рис.6 наведені результати дослідження бульбашок двох різних типів при однакових швидкостях їх росту. Температура устанавлювалася на різних відстанях від поверхні нагріву. Як видно з цих графіків, температурне поле біля бульбашки повністю відтворюється, тобто має однаковий характер зміни температур для різних одиничних бульбашок.

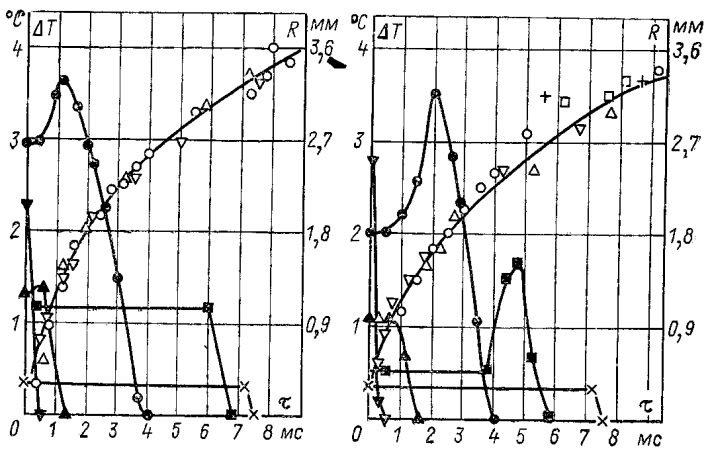


Рис.6. Зміна діаметра ростучої бульбашки і перегріву рідини біля неї при  $q = 86,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$  при відстані від поверхні нагріву:  $\nabla$  – 0,5 мм;  $\blacktriangle$  – 1,5 мм;  $\bullet$  – 2,5 мм;  $\blacksquare$  – 3,5 мм;  $\times$  – 5,5 мм

Цей факт дозволяє зробити припущення, що зміна температурного поля навколо бульбашки під час її росту не залежить від положення термопар. З урахуванням цього допущення можна перетворити

отриману температурну гістограму  $T = T_1(t)$  при  $\Delta X = \text{const}$  в  $T = T_2(\Delta X)$  при  $\tau = \text{const}$ .

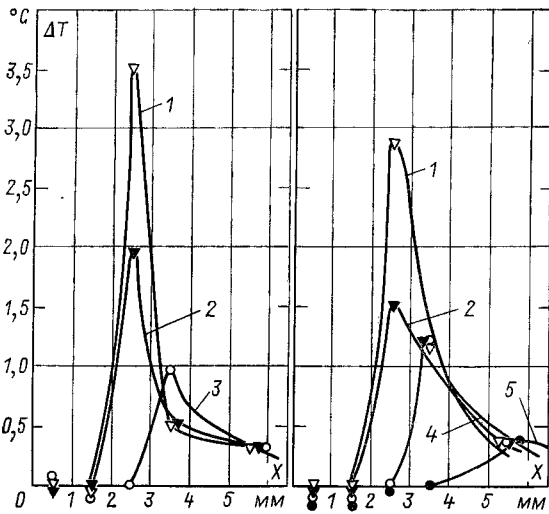


Рис.7. Залежність перегріву від відстані до гріючої стінки за: 1 – 2 мс; 2 – 3 мс; 3 – 4 мс; 5 – 7 мс

На рис.7 показаний розподіл температури для двох різних бульбашок. Очевидно, що навколо бульбашки існує тепловий пограничний шар, який виштовхується зростаючою бульбашкою. Крім цього з рис. 7 видно, що максимальна температура в тепловому пограничному шарі зменшується внаслідок відведення теплоти, обумовленої випаровуванням пари на границі розділу парорідина і нестационарного процесу переносу теплоти за рахунок теплопровідності в оточуючу рідину. Ці процеси приводять до збільшення

товщини теплового пограничного шару навколо бульбашки під час її росту. Зауважимо, що ці результати отримано з нерухомою термопарою і що тепловий пограничний шар зміщувався відносно термопарі зі швидкістю росту бульбашки, для визначення товщини пограничного шару необхідно враховувати цей рух.

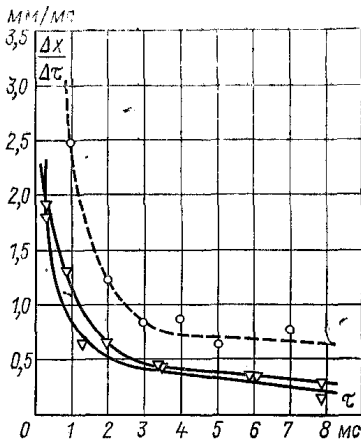


Рис.8. Швидкість розповсюдження температурної хвилі і її зв'язок зі швидкістю росту парової бульбашки:  
 — швидкість росту бульбашки  $dR/d\tau$ ;  
 - - - швидкість росту бульбашки + швидкість розповсюдження температурної хвилі

На підставі результатів наведених на рис.7, можна визначити швидкість розповсюдження максимальної температури в пограничному шарі. На рис.8 подано швидкість руху максимуму температури в пограничному шарі в залежності від швидкості росту бульбашки. Віднімаючи швидкість росту бульбашки зі швидкості руху максимуму температури, можна отримати швидкість розповсюдження теплоти в нестационарному пограничному шарі. Отримані значення швидкості необхідно порівняти з розрахунковими, виконаними за різними моделями росту бульбашки, які ґрунтуються на припущенні, що перенесення теплоти за рахунок теплопровідності в тепловому пограничному шарі навколо бульбашки під час її росту, визначають швидкість і механізм росту бульбашки.

Розв'язуючи одномірне рівняння нестационарної теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

при початкових і граничних умовах

$$T(x=0, \tau \leq 0) = T_{\max}; T(x=0, \tau > 0) = T_{sat}; T(x \leq 0, \tau \leq 0) = T_{\max}; T(x = \infty, \tau > 0) = T_{sat}; \\ T(x > \delta, \tau \leq 0) = T_{sat},$$

отримаємо:

$$\frac{T_{(x,t)} - T_{sat}}{T_{sat}} = \frac{Cx}{2\sqrt{aT\tau^3}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right).$$

У цьому рівнянні  $C$  – стала величина.

Диференціюючи цей вираз відносно координати і приймаючи  $\partial T/\partial x=0$ , можна отримати швидкість руху максимуму температури в пограничному шарі:

$$\frac{dV_{\max}}{d\tau} = \sqrt{\frac{a}{2\tau}} \quad (1)$$

і значення максимальної температури

$$T(V_{\max}, \tau) = \frac{\sqrt{2Ta}}{CT_{sat}}. \quad (2)$$

Рівняння (1) описує швидкість зміни максимуму температури в перегрітому шарі, а (2) характеризує зміну температури в перегрітому шарі під час росту бульбашки. Результати порівняння дослідних значень з розрахунковими свідчать, що навколо бульбашки існує перегрітий пограничний шар, а також доказують, що одна частина акумульованої теплоти в тепловому шарі йде на випаровування рідини на границі розділу фаз, а інша передається рідині, що оточує бульбашку. Крім цього, з порівняння слідує, що при бульбашковому кипінні механізм і характер росту бульбашки регулюється наявністю рідкого перегрітого шару, який існує навколо бульбашки. Все це свідчить, що температура поверхні теплообміну, отримана при безпосередньому вимірюванні поверхні, являє собою тільки осереднене значення пульсуючої температури біля гріючої стінки.

**Висновок.** Дослідження пульсацій температури у двофазній системі дозволяє отримати інформацію про процеси, що відбуваються в системі, і описати зміну місцевих і миттєвих характеристик окремих фаз. Ця інформація вносить певний вклад у розуміння процесів перенесення теплоти біля поверхні розділу рідина–пара. Варто зауважити, що недостатнє знання природи інших пульсаційних параметрів ускладнює повний опис процесів, які відбуваються біля гріючої стінки. Особливо це стосується пульсації швидкості і тиску в двофазній системі. Статистичні характеристики цих двох змінних величин як для кожної фази окремо, так і для двофазної системи повинні включати в себе їх взаємну кореляцію.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Afgan N.H.* Boiling liquid superheat. Oxford, New York: Pergamon press, 1979.– 80 p.
2. *Кулінченко В.Р., Зав'ялов В.Л.* Ріст парової бульбашки з урахуванням нерівноважного випаровування// Наукові праці НУХТ.– 2005, №16. – С. 164–166.
3. *Субботин В.И., Сорокин Д.Н., Цыганок А.А.* Механізм теплообмена при бульбашковом кипінні// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.– 1976, №4.– С. 93–101.