

УДК 536.24

Представлено фізичну модель процесу кипіння на пористих структурах в обмежених умовах, як результат обробки експериментальних даних та дослідів з візуалізації процесу. Наведено ряд диференціальних рівнянь, що описують процеси тепло- та масопереносу у капілярній структурі, у зовнішньому об'ємі рідини та у паровому утворенні при його наявності

Ключові слова: кипіння, пориста структура, обмежений простір, модель, рівняння

Представлена физическая модель процесса кипения на пористых структурах в стесненных условиях, как результат обработки экспериментальных данных и исследований визуализации процесса. Представлен ряд дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепло- и массопереноса в капиллярной структуре, во внешнем объеме жидкости и в паровом образовании, при его наличии

Ключевые слова: кипение, пористая структура, ограниченный объем, модель, уравнение

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КИПІННЯ НА ПОРИСТІЙ ПОВЕРХНІ В ОБМЕЖЕНИХ УМОВАХ

О. С. Алексеїк

Молодший науковий співробітник, асистент*

E-mail: Helga-Gor@mail.ru

В. Ю. Кравець

Кандидат технічних наук, доцент

E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

*Кафедра атомних електростанцій

та інженерної теплофізики

Національний технічний університет України «Київський

політехнічний інститут»

пр. Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

В сучасних системах охолодження радіоелектронного, комп'ютерного обладнання все більше використовуються пасивні системи охолодження, в основі роботи яких лежать випарно-конденсаційні цикли. Незначні габарити і висока ефективність тепловідведення роблять такі системи конкурентоспроможними в порівнянні із традиційними системами охолодження.

Проте проектування пасивних випарно-конденсаційних систем пов'язане із рядом труднощів, однією з яких є недостатність знань щодо процесів фазового перетворення в умовах обмеженого простору. Тому дослідження механізмів процесу кипіння у обмежених умовах є актуальною задачею.

2. Сучасний стан проблеми

Розглядаючи процес кипіння в обмежених умовах, слід відзначити, що переважна частина експериментальних та модельних досліджень мають на увазі процес вимушеного руху у каналах невеликих розмірів різної конфігурації [1, 2]. В тому числі, розглядаються процеси інтенсифікації теплообміну як за рахунок профілювання поверхні, так і шляхом нанесення на неї пористих покриттів [3]. У випадку ж, коли розглядається процес генерації пари на розвиненій поверхні при дії лише масових сил [4 – 6], процеси відбуваються в умовах великого об'єму, проте в умовах обмеженого простору мають місце фактори, які суттєво впливають на процеси тепло- та масопереносу. В зв'язку із цим

фізичні уявлення про процес кипіння можуть значною мірою відрізнятись від реальної картини.

В реальних пристроях досить часто зустрічається ситуація, коли кипіння відбувається в досить незначному об'ємі при відсутності вимушеного руху теплоносія. Зокрема, такі умови теплообміну мають місце в зонах нагріву теплових труб та термосифонів. Тому дослідження механізму кипіння на пористих поверхнях в умовах обмеженого простору та його закономірностей дозволить розробляти методики проектування та розрахунку подібних систем.

3. Експериментальна установка

Дослідна установка, робочі елементи та методики проведення експериментів і обробки їх результатів докладно описані в [7].

В даній статті представлені результати, отримані при кипінні води при атмосферному тиску на технічно гладкій мідній поверхні та на мідній метало-волокнистій капілярній структурі товщиною 1 мм і пористістю близько 80%. Розміри тепловіддаючих поверхонь були достатніми для моделювання процесу кипіння на нескінченній пластині [8].

4. Експериментальні дані

Як показали дослідження, характерні розміри простору, в якому відбувається процес кипіння, суттєво впливають на його інтенсивність у випадку кипіння на гладкій поверхні (рис. 1).

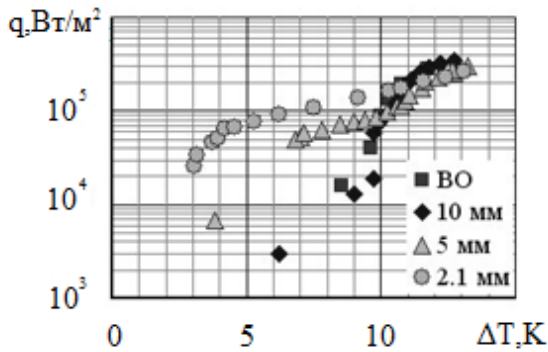


Рис. 1. Залежність густини теплового потоку, що відводиться (q) від величини перегріву тепловіддаючої поверхні (ΔT) при кипінні на гладкій поверхні в умовах обмеженого простору: ■ – умови кипіння у великому об’ємі; відстань між поверхнею та обмежувачем (рис. 2): ◆ - 10 мм; ▲ - 5 мм; ● - 2,1 мм

При зменшенні висоти h вільного об’єму над тепловіддаючою поверхнею (рис. 2) відбувається інтенсифікація процесу тепловідведення, причому збільшення коефіцієнту тепловіддачі тим більше, чим менша відстань від тепловіддаючої поверхні до обмежувача. Це, вірогідно, можна пояснити тим, що при зменшенні об’єму теплоносія над тепловіддаючою поверхнею відбувається збільшення середнього перегріву рідини відносно температури насичення. Тому при відриві парової бульбашки до центру пароутворення надходить теплоносій із більшою температурою. Внаслідок цього період очікування, протягом якого рідина набуває перегріву, достатнього для утворення парового зародку, зменшується, частота утворення парових бульбашок збільшується і, відповідно, процес відведення теплоти інтенсифікується.

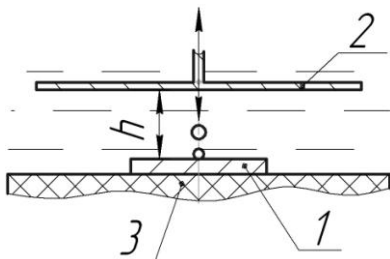


Рис. 2. Схема робочої ділянки: 1 – тепловіддача поверхня; 2 – обмежувач; 3 – несуча стінка

У випадку ж кипіння на пористому покритті вплив висоти вільного простору є не таким вираженим (рис. 3), причому характер зміни процесу тепловідведення суттєво залежить від відстані h (рис. 2) та густини теплового потоку, що відводиться.

На основі аналізу експериментальних даних та результатів візуалізаційних досліджень, була побудована фізична модель процесу кипіння на пористій поверхні в умовах обмеженого простору, за допомогою якої можна пояснити зменшення інтенсивності тепловіддачі при зменшенні висоти вільного простору, а також значну відмінність від закономірностей, що мають місце при кипінні на гладкій поверхні. В

якості вихідної, була прийнята модель, описана у [9]. Крім цього, представлено ряд математичних залежностей, що можуть бути використані при побудові математичної моделі вказаного процесу.

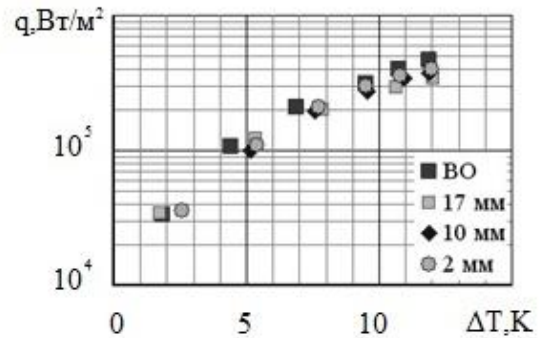


Рис. 3. Залежність густини теплового потоку, що відводиться (q) від величини перегріву тепловіддаючої поверхні (ΔT) при кипінні на пористій поверхні в умовах обмеженого простору: ■ – умови кипіння у великому об’ємі; відстань між поверхнею та обмежувачем (рис. 2): ■ - 17 мм; ◆ - 10 мм; ● - 2 мм

5. Фізична модель процесу

В залежності від густини теплового потоку, що відводиться, а також висоти, на якій розташований обмежувач, було виділено такі характерні режими теплообміну при кипінні на пористій поверхні:

1. конвективний перенос теплоти при низьких густинах теплових потоків;
2. кипіння при відсутності впливу парової хмари біля обмежувача;
3. кипіння при наявності впливу парової хмари біля обмежувача.

Розглянемо ці режими більш детально.

5.1. Конвективний перенос теплоти при низьких густинах теплових потоків

При підведенні густин теплових потоків менших за густину теплового потоку початку кипіння ($q < q_{пк}$) процес передачі теплоти здійснюється крізь пористу поверхню за рахунок теплопровідності, а далі до теплоносія – конвекцією. При цьому рухом теплоносія у пористій структурі можна знехтувати внаслідок її значного, в порівнянні із каналом, гідравлічного опору. У каналі внаслідок дії гравітаційних сил відбувається розшарування теплоносія на протилежно направлені гарячий $w_{гор}$ та холодний потоки $w_{хол}$ (рис. 4).

В даному випадку, процес переносу теплоти можна розглядати як процес теплопередачі від гладкої стінки до потоку у каналі, утвореному стінкою та обмежувачем.

Зміна відстані між поверхнею пористого покриття та обмежувачем суттєвого впливу на процес тепло переносу не має, оскільки інтенсивність тепловідведення визначається, переважно характеристиками пористого покриття та теплофізичними властивостями рідини.

Для математичного описання процесу приймемо такі припущення:

1. розміри елементарної поверхні, що розглядається, такі, що впливом крайових ефектів можна знехтувати;
2. поверхня теплообміну та поверхня, що обмежує об'єм розташовані горизонтально у полі дії масових сил;
3. обмежуюча поверхня є адиабатною, тобто теплообміну між нею та рідиною і паром не відбувається;
4. зона відведення теплоти знаходиться на певному віддаленні від зони підведення теплоти, проте рух гарячого теплоносія або пари та повернення холодної рідини має місце;
5. будь-який вимушений направлений рух теплоносія у системі відсутній. Рух викликається лише дією масових та капілярних сил та природними перепадами тиску між зонами підведення та відведення теплоти;
6. пориста структура є метало-волокнистою, тобто існує певна неоднорідність у діаметрах пір;
7. термічним опором між несучою стінкою та пористим покриттям нехтуємо, тобто контакт між ними вважаємо ідеальним;
8. розтічками теплоти вздовж капілярної структури можна знехтувати;
9. процеси стаціонарні.

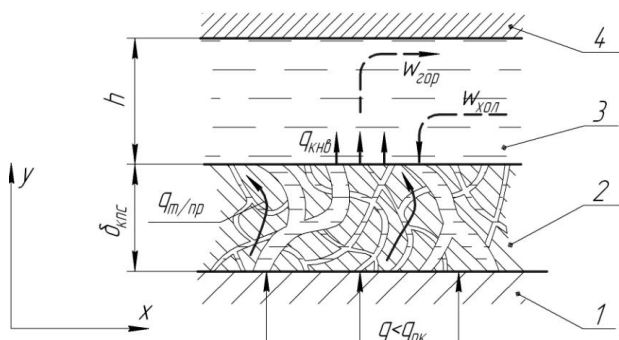


Рис. 4. Перенос теплоти у пористому покритті і теплоносії при $q < q_{плк}$: 1 – несуча стінка; 2 – пористе покриття; 3 – теплоносіє; 4 – обмежувач

Тоді для описання процесу тепломасообміну можна використати такі рівняння:

1) диференційне рівняння теплопровідності, що з врахуванням припущень 8-10 матиме вигляд:

$$\frac{d^2 T_c}{dy^2} = 0, \tag{1}$$

де T_c – температура структури, К; y – поперечна координата (рис. 3), м;

Граничні умови (ГУ) для даного рівняння мають вигляд:

- на границі $y=0$ задаються ГУ II роду:

$$q_{підв} = -\lambda_{эф} \cdot \frac{dT_c}{dy} \Big|_{y=0}, \tag{2}$$

де $q_{підв}$ – густина теплового потоку, що підводиться, Вт/м²;

- на границі $y=\delta_{кпс}$ – ГУ III роду:

$$-\lambda_{эф} \frac{\partial T_c}{\partial y} \Big|_{y=\delta_{кпс}} = \alpha_{кнв} (T_c - T_p),$$

де $\lambda_{эф}$ – ефективна теплопровідність насиченої капілярної структури, що може бути визначена за методиками, приведеними в літературі, зокрема в [10, 11], Вт/(м·К); $\alpha_{кнв}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/м²·К; T_p – температура рідини, К.

Коефіцієнт тепловіддачі наближено можна визначити в залежності від отримуваних швидкостей руху як для випадку тепловіддачі при вимушеній конвекції від горизонтальної пластини при ламінарному режимі течії або як для тепловіддачі при вільній конвекції від горизонтальної пластини.

2) двовимірне диференціальне рівняння руху для ламінарного режиму течії з врахуванням дії масових сил, матиме вигляд:

$$\rho_0 (1 - \beta v) \left(w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_p \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right), \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \rho_0 (1 - \beta v) \left(w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) &= \\ &= -\rho_0 (1 - \beta v) g + \mu_p \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \tag{5}$$

де w_x, w_y – відповідні проекції швидкості рідини на осі x, y , м/с; ρ_0 – густина при температурі T_{p0} , кг/м³; β – об'ємний коефіцієнт розширення, 1/К; $v = T_{p0} - T_p$ –

локальний перегрів рідини, К; $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}$ – відповідно

повздовжній та поперечний градієнти тиску, Па/м; g – прискорення вільного падіння, м/с²; μ_p – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Н/м.

В якості граничних умов можна прийняти умови прилипання рідини на стінках, також слід враховувати наявність зустрічного руху теплоносія.

3) рівняння нерозривності для рідини із непостійною густиною:

$$\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} = 0, \tag{6}$$

4) двовимірне рівняння енергії для теплоносія:

$$(1 - \beta v) \left(w_x \frac{\partial T_p}{\partial x} + w_y \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) = \frac{\lambda_p}{c_p \rho_0} \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right), \tag{7}$$

де λ_p – коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(м·К); c_p – коефіцієнт теплопровідності рідини, Дж/(кг·К).

5.2. Кипіння при відсутності впливу парової хмари біля обмежувача

При збільшенні густини теплового потоку до величини більшої, за $q_{плк}$, у пористій структурі поблизу стінки починається кипіння. Поступово пара витісняє із деяких пор капілярної структури рідину і на поверхні затопленої капілярно-пористої структури (КПС) почи-

1) рівняння двофазної фільтрації [11], яке для даного випадку матиме вигляд:

$$\frac{4\sigma}{D_{\text{екв}}} - \frac{v_n \cdot q_{\text{нлв}} \cdot \delta_{\text{кис}} \cdot k_1}{K_0 \cdot K_2(1-W) \cdot r} \left[\frac{q_{\text{нлв}}}{r(1-W)} \right]^2 \times \times \frac{1}{\rho_n} - \frac{v_p \cdot q_{\text{нлв}} \cdot k_2 \cdot L_0}{K_0 \cdot K_1(W) \cdot r \cdot \delta_{\text{кис}}} - \Delta p_0 \geq 0 \quad (11)$$

де L_0 – характерна довжина «транспорту» рідини; Δp_0 – сумарні втрати тиску у КПС, що визначаються за формулою:

$$\Delta p_0 = \Delta p_p + \Delta p_{\text{п}} - \Delta p_{\text{м}}, \quad (12)$$

де Δp_p – втрати на тертя у КПС при течії рідини; $\Delta p_{\text{п}}$ – втрати на тертя у КПС при течії пари; $\Delta p_{\text{м}}$ – втрати тиску за рахунок дії масових сил.

2) рівняння для визначення насиченості пористої структури [11]:

$$\frac{v_n}{K_2^2(1-W)} \frac{\partial [K_2(1-W)]}{\partial W} \cdot k_1 \times \times \delta_{\text{кис}} + \frac{v_p \cdot k_1}{K_1^2(W)} \frac{\partial [K_1(W)]}{\partial W} \frac{L_0^2}{\delta_{\text{кис}}} - -2K_0 \left(\frac{q_{\text{нлв}}}{r \cdot \rho_n} \right)^2 \frac{\rho_n}{(1-W)^3} = 0. \quad (13)$$

Для визначення значень $K_i(W)$ необхідно використовувати систему.

3) рівняння руху парової фази ззовні капілярно-пористої структури:

$$w_x'' \frac{\partial w_x''}{\partial x} + w_y'' \frac{\partial w_y''}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_n} \frac{\partial p_n}{\partial x} + v_n \left(\frac{\partial^2 w_x''}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x''}{\partial y^2} \right), \quad (14)$$

$$w_x'' \frac{\partial w_y''}{\partial x} + w_y'' \frac{\partial w_y''}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_n} \frac{\partial p_n}{\partial y} + v_n \frac{\partial^2 w_y''}{\partial y^2}, \quad (15)$$

де w_x'' , w_y'' - відповідні проекції швидкості пари на осі x , y .

Граничні умови для рівняння Нав'є-Стокса можуть бути використані такі:

$$w_x'' \Big|_{y=\delta_{\text{кис}}} = 0, \quad (16)$$

$$w_x'' \Big|_{y=\delta_{\text{кис}}+h} = 0, \quad (17)$$

$$w_y'' \Big|_{y=\delta_{\text{кис}}} = \frac{q_{\text{нлв}}}{r \cdot \rho_n}, \quad (18)$$

$$w_y'' \Big|_{y=\delta_{\text{кис}}+h} = 0, \quad (19)$$

4) рівняння нерозривності для пари:

$$\frac{\partial w_x''}{\partial x} + \frac{\partial w_y''}{\partial y} = 0, \quad (20)$$

5) двовимірне рівняння енергії для пари ззовні КПС:

$$w_x'' \frac{\partial T_n}{\partial x} + w_y'' \frac{\partial T_n}{\partial y} = \frac{\lambda_n}{c_{\text{п}} \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} \right), \quad (21)$$

Всі приведені вище системи необхідно замикати за допомогою граничних умов, допоміжних рівнянь або вводити додаткові обмеження, оскільки в даному вигляді вони не може бути розв'язані аналітично через значну кількість факторів, що впливають на досліджувані процеси.

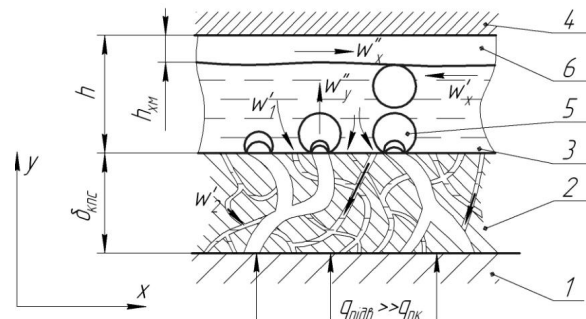


Рис. 6. Модель масопереносу при кипінні на пористій структурі при наявності впливу парової хмари під обмежувачем: 1 – несуча стінка; 2 – пористе покриття; 3 – теплоносій; 4 – обмежувач; 5 – парові бульбашки; 6 – парова хмара

6. Висновки

1. Показано, що на відміну від кипіння на гладких поверхнях, зменшення висоти вільного простору над пористим покриттям не призводить до інтенсифікації процесу теплообміну.

2. Представлено три основних режими тепломасопереносу при тепловідведенні при наявності пористої структури в обмеженому просторі, а саме конвективний перенос теплоти при низьких густинах теплових потоків, а також режими кипіння при відсутності та при наявності впливу парової хмари біля верхньої границі об'єму.

3. Представлено фізичну модель, а також ряд математичних рівнянь для кожного із режимів.

Литература

1. Лабунцов, Д. А. Аналитическое и экспериментальное исследование процессов кипения в трубах малого диаметра [Текст] / Д. А. Лабунцов, О. П. Евдокимов, И. В. Тишин, А. Ф. Ульянов // Изв. вуз. Машиностроение. – 1970 – №7. – С. 68–73, 102–105.
2. Земсков, Б. Б. Исследование теплообмена и гидродинамики при кипении фреонов в каналах сложной формы. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук [Текст] / Б. Б. Земсков. – Л., 1978. – 28 с.

3. Кузма-Китча, Ю. А. Улучшение характеристик элементов парогенерирующей техники путем интенсификации теплообмена [Текст] / Ю. А. Кузма-Китча, А. С. Комендантов, Г. Барч // In: Proc. 4th Minsk International Heat and Mass Transfer Forum. – Minsk, Belarus. – 2000. – pp. 215–222.
4. Wojcik, T. M. Experimental investigations of boiling heat transfer hysteresis on sintered, metal-Fibrous, porous structures [Текст] / T. M. Wojcik // Experimental Thermal and Fluid Science – 2009 – March (Vol. 33, Iss. 3) – pp. 397–404.
5. Cieslinski, J. T. Nucleate pool boiling on porous metallic coatings [Текст] / J. T. Cieslinski // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2002. – January (Vol. 25, Iss. 7) – pp. 557–564.
6. Das, A. K. Performance of different structured surfaces in nucleate pool boiling [Текст] / A. K. Das, P. K. Das, P. Saha // Applied Thermal Engineering. – 2009. – December (Vol. 29, Iss. 17–18) – pp. 3643–3653.
7. Алексеик, О. С. Интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера [Текст] / О. С. Алексеик, В. Ю. Кравец, И. А. Копчевская // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2012. – №1. – С.49-53.
8. Kravets, V. Yu. Boiling Heat-Transfer Intensity on Small-Scale Surface [Текст] / V. Yu. Kravets, O. S. Alekseik // International Review of Mechanical Engineering. – March 2012. – Vol. 6, N. 3, Part A. – pp. 479–484.
9. Шаповал, А. А. Теплообмен при кипении воды и ацетона на поверхностях с металловолоконными капиллярно-пористыми покрытиями. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.04.14 [Текст] / А. А. Шаповал – Киев, Институт технической теплофизики, 1985. – 23 с.
10. Семена, М. Г. Тепловые трубы с металловолоконными капиллярными структурами [Текст] / М. Г. Семена, А. Н. Гершуни, В. К. Зарипов. – К: Вища шк. Головное изд-во, 1984 – 215 с.
11. Смирнов, Г. Ф. Теплообмен при парообразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах [Текст] / Г. Ф. Смирнов, А. Д. Цой – М.: Из-во МЭИ, 1999 – 440 с.

Запропоновано використання прогнозуючої аналітичної оцінки зміни температури зброджування та принцип інтелектуального управління теплонасосним енергопостачанням щодо зміни витрати холодагента в випарнику теплового насоса в залежності від температури відвантаженої сировини. Такий підхід надає можливість приймати упереджені рішення на своєчасне відвантаження зброженої сировини в режимі розряду біогазової установки та завантаження еквівалентної витрати свіжої сировини в режимі заряду

Ключові слова: біогазова установка, тепловий насос, прийняття рішень

Предложено использовать прогнозирующую аналитическую оценку изменения температуры сбраживания и принцип интеллектуального управления теплонасосным энергоснабжением для изменения расхода хладагента в испарителе теплового насоса в зависимости от температуры выгружаемого сырья. Такой подход предоставляет возможность принимать упреждающие решения на своевременную выгрузку сброженного сырья в режиме разряда биогазовой установки и загрузку эквивалентного расхода свежего сырья в режиме заряду

Ключевые слова: биогазовая установка, тепловой насос, принятия решений

УДК 621.182.2.001.57

ІНТЕГРОВАНА ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

Є. Є. Чайковська

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент
Кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
Одеський національний політехнічний університет
пр. Шевченка, 1,
м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: eechaikovskaya@list.ru

1. Вступ

Статичні методи оптимізації енергетичних систем не враховують оцінку зміни теплової акумулюючої ємності, яка, відтворюючи виробництво та споживання енергії у співвідношенні, надає можливість прогнозувати зміну параметрів технологічного процесу, а не ліквідувати наслідки їх зміни [1 – 3]. Існуючі системи підтримки функціонування біогазових установок не завжди достовірно використовують вимірювання температури зброджування сировини, що обумовлено її значною тепловою акумулюючою ємністю. Більш того,

регулюючим впливом при зміні температури зброджування є зміна витрати суслу, що може порушити необхідний баланс свіжої та зброженої сировини [4, 5].

2. Постановка задачі

Для підтримки технологічного процесу здобуття біогазу у зв'язку із значною тепловою акумулюючою ємністю суслу необхідно здобути прогнозуючу аналітичну оцінку зміни температури зброджування. Такий підхід надасть можливість прийняття уперед-