

УДК 664.1.054

## **ANALYTICAL EXPRESSIONS FOR DETERMINING CELLULAR SYSTEMS CONTACT TIME WITH THE HEATING TUBE SURFACE OF VACUUM APPARATUS HEATING CHAMBER**

**T. Pogorily, V. Mironchuk**

*National University of Food Technologies*

**K. Shtangeev**

*Institute of Post-Diploma Training of the NUFT*

---

**Key words:**

*Speed*

*Contact time*

*Lift height*

*Cell*

*Economizer area*

---

**Article history:**

Received 14.11.2015

Received in revised form  
26.11.2015

Accepted 15.12.2015

---

**Corresponding author:**

T. Pogorily

**E-mail:**

taras22@mail.ru

---

**ABSTRACT**

The paper presents the results of determining the time of full contact of a cellular system with the surface of a heating tube of heating chamber of vacuum apparatus. Under certain assumptions, the desired contact time was determined for the following two cases: a) excluding economizer area — the speed of cellular system movement from the heating pipe entry point to the exit point is growing in direct ratio; b) including economizer area — the speed of cellular system movement from the heating pipe entry point to the end of economizer area is stable and from the boiling point to the exit point of the heating pipe it is growing in direct ratio. According to the analytical expressions based on experimental data on the velocity distribution of masecuite at the entrance to the heating tube and at its exit, the contact time for the cellular systems and the surface of the heating tube was determined for particular cases.

---

## **АНАЛІТИЧНІ ВИРАЗИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ КОНТАКТУ СИСТЕМ КОМІРОК З ПОВЕРХНЕЮ ГРІЮЧОЇ ТРУБКИ НАГРІВАЛЬНОЇ КАМЕРИ ВАКУУМ-АПАРАТА**

**Т.М. Погорілий, В.Г. Мирончук**

*Національний університет харчових технологій*

**К.О. Штангєєв**

*Інститут післядипломної освіти НУХТ*

*У статті представлено результати визначення повного часу контакту систем комірок з поверхнею гріючої трубки нагрівальної камери вакуум-апарата. Визначення шуканого часу контакту проводилося за певних припущень для двох випадків: а) без урахування економайзерної зони, коли швидкість руху системи комірок від точки входу в гріючу трубку до точки виходу з неї відбувається за прямо пропорційним зростаючим законом; б) з урахуванням економайзерної зони, коли швидкість руху системи комірок від точки*

входу в гріючу трубку до кінця економайзерної зони є величиною сталою, а з точки початку зони кипіння і до точки виходу з гріючої трубки відбувається за прямо пропорційним зростаючим законом. За отриманими аналітичними виразами на основі експериментальних даних про розподіл швидкостей утфелю при вході в гріючу трубку та на виході з неї для окремих випадків знайдено час контакту системи комірок з поверхнею гріючої трубки.

**Ключові слова:** швидкість, час контакту, висота підйому, комірка, економайзерна зона.

**Постановка проблеми.** Для ефективного керування найбільш енергоємним у виробництві цукру процесом кристалізації сахарози необхідно створити математичну модель, яка б найповніше описувала процес тепло- та масообміну, що відбувається між складовими частинами багатофазної системи, якою є цукровий утфель.

Для створення такої математичної моделі процесу масової кристалізації сахарози необхідно знайти розв'язок нестационарних задач теплопровідності та дифузійного масообміну для системи комірок з урахуванням відносного часу уварювання цукрового утфелю та часу перебування системи комірок у гріючій трубці нагрівальної камери вакуум-апарата.

**Мета дослідження.** Аналітично визначити час контакту системи комірок із поверхнею гріючої трубки нагрівальної камери вакуум-апарата, що дасть змогу знайти числові значення перебування системи комірок у гріючій трубці з урахуванням експериментальних даних про розподіл швидкості входу утфелю в гріючу трубку та виходу паро-утфельної суміші з неї.

**Виклад основних результатів дослідження.** При створенні математичної моделі кристалізації сахарози вдалися до певних припущень і спрощень, оскільки достатньо повно описати такий складний процес, як кристалізація речовин із розчинів з урахуванням усіх технологічних факторів, що впливають на його проходження, практично надзвичайно складно.

Цукровий утфель, що являє собою багатофазну систему, представлено у вигляді комірчастої моделі [1—5]. У процесі дослідження обмежилися кількістю кристалів цукру, що дорівнює двом. Система комірок розглядається такою, що комірки кристалів цукру, які, у свою чергу, обмежені відповідними за об'ємом міжкристалічними розчинами сахарози, щільно прилягають одна до одної, а також однією стороною першої комірки щільно прилягають або до поверхні гріючої трубки (рис. 1), або ж до парової бульбашки (рис. 2), коли вона утворюється. З іншої сторони друга комірка контактує безпосередньо з утфелем (рис. 1, рис. 2). Розглянемо осесиметричну задачу, де саме утфель і є тією коміркою, через яку проходить вісь симетрії (рис. 1, рис. 2). Комірки розглянутих систем розташовані перпендикулярно до поверхні гріючої трубки (рис. 1, рис. 2), тобто горизонтально.

Приймаємо, що рух такої системи комірок у середині гріючої трубки (рис. 3) при підйомі з нижньої точки входу і до верхньої точки виходу [6] має характер ідеального витіснення поршневого типу і є ламінарним.

Також приймаємо, що економайзерна зона гріючої трубки розпочинається в нижній її частині та завершується в тому місці, де утворюються перші парові бульбашки, тобто розпочинається зона кипіння (рис. 3).

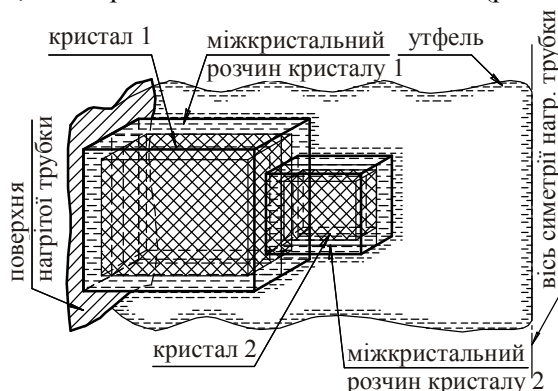


Рис. 1. Схема розташування комірок системи I: кристали цукру–міжкристальні розчини сахарози–утфель

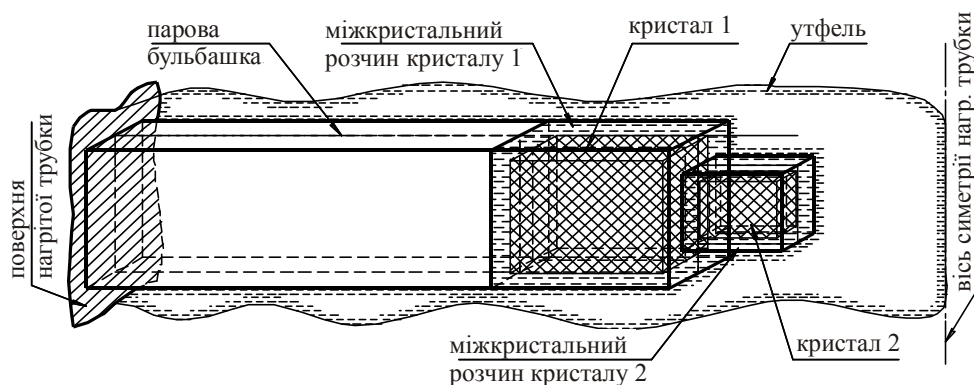


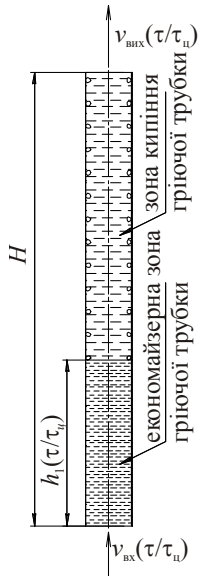
Рис. 2. Схема розташування комірок системи II: парова бульбашка–кристали цукру–між кристальні розчини сахарози–утфель

При вході в гріючу трубку нагрівальної камери вакуум-апарата дисперсна система представлена у вигляді комірок кристалів цукру–міжкристальні розчини сахарози, що оточують ці кристали–утфель. Позначимо таку систему комірок через номер I (рис. 1). У такому вигляді розглядаємо систему комірок I до кінця економайзерної зони (рис. 3), тобто впродовж частини довжини вертикальної гріючої трубки, в межах якої відбувається прогрівання утфелю до початку утворення перших парових зародків.

З моменту утворення перших парових зародків (бульбашок), тобто з початкової точки зони (рис. 3) кипіння впродовж усього часу їх зростання і до моменту відриву, розглядаємо вже іншу систему комірок: парова бульбашка–кристали цукру–міжкристальні розчини сахарози–утфель, яку позначимо через номер II (рис. 2). У даному випадку вважаємо, що така система комірок II зберігається до моменту виходу всієї системи комірок з гріючої трубки.

Таким чином, зміна температур і розподіл концентрацій між комірками системи I та II будуть визначатися на основі розв'язку нестационарних задач

теплопровідності та дифузійного масообміну всередині гріючої трубки і в повній мірі залежатиме від шуканого часу контакту всієї системи комірок з поверхнею гріючої трубки.



**Рис. 3.** Схема розташування вертикальної гріючої трубки з економайзерною зоною:

$v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{\text{ц}})$  — швидкість входу утфелю в нагр. трубку;  $v_{\text{вих}}(\tau/\tau_{\text{ц}})$  — швидкість виходу паро-утфельної суміші з нагр. трубки;  $H$  — висота нагр. трубки;  $h_1(\tau/\tau_{\text{ц}})$  — висота економайзерної зони нагр. трубки

$0,15 \leq \tau/\tau_{\text{ц}} \leq 1,0$  (тобто коли в міжкристалльному розчині сахарози наявні кристали цукру).

Початковим моментом часу  $t_0 = 0$  контакту вважається той момент, коли вся система комірок I потрапляє в нижню частину гріючої трубки. Час проходження економайзерної зони позначимо через  $t_1(\tau/\tau_{\text{ц}})$ . Кінцевий момент часу контакту системи комірок II з гріючою трубкою, тобто момент часу виходу системи комірок II з гріючої трубки, позначимо через  $t_2(\tau/\tau_{\text{ц}})$ . Також введемо позначення (рис. 3) для змінної швидкості входу системи комірок у гріючу трубку через  $v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{\text{ц}})$ , та змінної швидкості виходу системи комірок з гріючої трубки через  $v_{\text{вих}}(\tau/\tau_{\text{ц}})$ . Відлік висоти гріючої трубки розпочинається з нижньої її точки, де приймаємо, що  $h = 0$ . Кінець економайзерної зони позначимо через висоту  $h_1(\tau/\tau_{\text{ц}})$ . Довжину гріючої трубки позначимо через величину  $H$  (рис. 3). Таким чином, потрібно знайти розподіл швидкості руху  $v(h, \tau/\tau_{\text{ц}})$  системи комірок у гріючій трубці залежно від висоти підйому та відносного часу уварювання цукрового утфелю.

Розглянемо спочатку випадок, коли економайзерна зона в гріючій трубці відсутня ( $h_1(\tau/\tau_{\text{ц}}) = 0$ ), і парова фаза утворюється відразу в початковий момент входу системи комірок у гріючу трубку, що дасть змогу відразу

Питання стосовно розмірів комірок детально розглянуто в [1–4]. Питання розподілу температур і концентрацій між комірками в пропонованому дослідженні не розглядається через складність та обмеженість об'єму даної статті.

Таким чином, беручи до уваги [2–5] розміри складових системи комірок I та II, а також розміри діаметра ( $d = 98,6$  мм) та довжини ( $l = 0,98$  м) гріючої трубки, вважаємо, що система комірок I практично «миттєво» повністю входить у гріючу трубку в нижній її точці входу, тоді як система комірок II «миттєво» виходить з неї у верхній точці.

Усі подальші міркування здійснюються на основі того, що процес руху системи комірок у гріючій трубці розглядається з урахуванням відносного часу уварювання цукрового утфелю  $\tau/\tau_{\text{ц}}$ , за умови, що величина  $\tau/\tau_{\text{ц}}$  змінюється в межах

розглянути систему комірок II. В даному випадку вважатимемо, що наростання швидкості  $v(h, \tau/\tau_{ц})$  від величини  $v_{вх}(\tau/\tau_{ц})$  до величини  $v_{вих}(\tau/\tau_{ц})$  відбувається за прямо пропорційним законом (рис. 4).

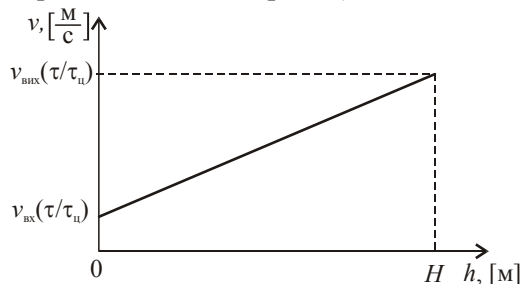


Рис. 4. Зміна швидкості руху системи комірок у гріючій трубці залежно від висоти підйому за відсутності економайзерної зони (схематично)

Граничні умови для знаходження шуканого закону зміни швидкості руху системи комірок у гріючій трубці можна записати в такому вигляді (рис. 4):  $v(0, \tau/\tau_{ц}) = v_{вх}(\tau/\tau_{ц})$  для точки входу в гріючу трубку та  $v(H, \tau/\tau_{ц}) = v_{вих}(\tau/\tau_{ц})$  — для точки виходу з неї. На основі цього складемо лінійне рівняння відносно шуканої функції швидкості  $v(h, \tau/\tau_{ц})$  з урахуванням висоти підйому  $h$  при фіксованому значенні відносного часу уварювання  $\tau/\tau_{ц}$ :

$$\frac{h-0}{H-0} = \frac{v(h, \tau/\tau_{ц}) - v_{вх}(\tau/\tau_{ц})}{v_{вих}(\tau/\tau_{ц}) - v_{вх}(\tau/\tau_{ц})} \quad (1)$$

Після певних перетворень рівняння (1) остаточно можна записати в такому вигляді:

$$v(h, \tau/\tau_{ц}) = \frac{v_{вих}(\tau/\tau_{ц}) - v_{вх}(\tau/\tau_{ц})}{H} \cdot h + v_{вх}(\tau/\tau_{ц}), \quad (0 \leq h \leq H) \quad (2)$$

Для знаходження всього часу перебування системи комірок у гріючій трубці, який позначимо через  $t_k(H, \tau/\tau_{ц})$ , складемо диференціальне рівняння. Виділимо в будь-якому місці по вертикалі гріючої трубки нескінченно малий прошарок (відрізок) висотою  $\Delta h$ . На цьому прошарку висотою  $\Delta h$  вважатимемо, що зміна швидкості  $\Delta v(h, \tau/\tau_{ц})$  системи комірок всередині трубки настільки незначна, що нею можна знехтувати і прийняти її за постійну величину (за основу приймаємо миттєву швидкість входу системи комірок у цей прошарок). Тоді миттєвий проміжок часу  $\Delta t_k(\Delta h, \tau/\tau_{ц})$ , який необхідний системі комірок для подолання шляху висоти підйому  $\Delta h$  при миттєвій швидкості  $v(h, \tau/\tau_{ц})$ , буде дорівнювати:

$$\Delta t_k(\Delta h, \tau/\tau_{ц}) = \frac{\Delta h}{v(h, \tau/\tau_{ц})} \quad (3)$$

Інтегруючи вираз (3) по змінній величині висоти підйому  $h$  в межах від  $h = 0$  до  $h = H$ , отримуємо, що повний час перебування  $t_k(H, \tau/\tau_{ц})$  системи комірок II у гріючій трубці визначатиметься за таким виразу:

$$t_k(H, \tau / \tau_{II}) = \int_0^H \frac{dh}{v(h, \tau / \tau_{II})}. \quad (4)$$

Після певних перетворень підінтегрального виразу (4) на основі виразу (2), остаточно знайдемо аналітичний вираз для шуканого часу контакту  $t_k(H, \tau/\tau_{II})$  системи комірок з поверхнею гріючої трубки без економайзерної зони в такому вигляді:

$$t_k(H, \tau / \tau_{II}) = \frac{H}{v_{\text{вих}}(\tau / \tau_{II}) - v_{\text{вх}}(\tau / \tau_{II})} \cdot \ln \frac{v_{\text{вих}}(\tau / \tau_{II})}{v_{\text{вх}}(\tau / \tau_{II})}. \quad (5)$$

Розглянемо тепер випадок (рис. 5), коли в гріючій трубці існує економайзерна зона висотою  $h_1(\tau/\tau_{II}) > 0$ , де в утфелі ще не утворюється парова фаза, а відбувається лише його прогрівання до температури кипіння. Зрозуміло, що ця величина буде залежати від багатьох параметрів, насамперед від відносного часу уварювання цукрового утфелю  $\tau/\tau_{II}$ .

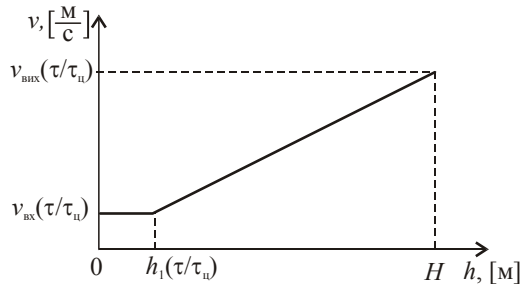


Рис. 5. Зміна швидкості руху системи комірок у гріючій трубці з урахуванням висоти підйому за наявності економайзерної зони (схематично)

У даному випадку позначимо швидкість підйому системи комірок у гріючій трубці через величину  $v^*(h, \tau/\tau_{II})$ . Як видно з рис. 5, існує вже два інтервали ( $0 \leq h \leq h_1(\tau/\tau_{II})$  та  $h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H$ ), де швидкість руху  $v^*(h, \tau/\tau_{II})$  матиме різний характер і описуватиметься різними рівняннями.

На першому інтервалі  $0 \leq h \leq h_1(\tau/\tau_{II})$  (рис. 5), тобто від нижньої точки входу в гріючу трубку (рис. 3) і до кінця економайзерної зони висотою  $h_1(\tau/\tau_{II})$ , вважаємо, що швидкість руху системи комірок буде постійною і дорівнюватиме початковій швидкості на вході  $v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{II})$ , оскільки парова фаза там ще не утворюється. В даному випадку час перебування системи комірок I в економайзерній зоні, який позначимо через  $t_{к,1}^*(h_1(\tau/\tau_{II}), \tau/\tau_{II})$ , розраховується на основі такого виразу:

$$t_{к,1}^*(h_1(\tau / \tau_{II}), \tau / \tau_{II}) = \frac{h_1(\tau / \tau_{II})}{v_{\text{вх}}(\tau / \tau_{II})}, \quad 0 \leq h \leq h_1(\tau / \tau_{II}). \quad (6)$$

На другому інтервалі  $h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H$  (рис. 5), тобто від початкової точки зони кипіння і до точки виходу з гріючої трубки (рис. 3), як і в розглянутому вище випадку без економайзерної зони, вважаємо, що швидкість руху

$v^*(h, \tau/\tau_{II})$  системи комірок II зростає за прямо пропорційним законом. Проводячи аналогічну до виразу (1) методику отримання прямолінійно зростаючого закону зміни швидкості руху (підйому) системи комірок для нашого випадку з наявною економайзерною зоною стосовно другого інтервалу  $h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H$  (рис. 5) гріючої трубки (рис. 3), отримаємо, що за граничних умов  $v^*(h_1(\tau/\tau_{II}), \tau/\tau_{II}) = v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{II})$  та  $v^*(H, \tau/\tau_{II}) = v_{\text{вих}}(\tau/\tau_{II})$  шукана швидкість  $v^*(h, \tau/\tau_{II})$  визначатиметься з такого рівняння:

$$\frac{h - h_1(\tau/\tau_{II})}{H - h_1(\tau/\tau_{II})} = \frac{v^*(h, \tau/\tau_{II}) - v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{II})}{v_{\text{вих}}(\tau/\tau_{II}) - v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{II})}, \quad h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H. \quad (7)$$

Після певних перетворень рівняння (7), шукану швидкість  $v^*(h, \tau/\tau_{II})$  для інтервалу  $h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H$  остаточно можна записати в такому вигляді:

$$v^*(h, \tau/\tau_{II}) = \frac{v_{\text{вих}}(\tau/\tau_{II}) - v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{II})}{H - h_1(\tau/\tau_{II})} \cdot h + \frac{v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{II}) \cdot H - v_{\text{вих}}(\tau/\tau_{II}) \cdot h_1(\tau/\tau_{II})}{H - h_1(\tau/\tau_{II})}, \quad (8)$$

$$h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H.$$

Стосовно визначення часу перебування системи комірок у другому інтервалі  $h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H$ , який у даному випадку позначимо через  $t_{\kappa,2}^*(h_1(\tau/\tau_{II}), H, \tau/\tau_{II})$ , застосуємо аналогічну до попереднього випадку методику складання диференціального рівняння. Таким чином, отримуємо:

$$t_{\kappa,2}^*(h_1(\tau/\tau_{II}), H, \tau/\tau_{II}) = \int_{h_1(\tau/\tau_{II})}^H \frac{dh}{v^*(h, \tau/\tau_{II})}. \quad (9)$$

Після певних перетворень підінтегрального виразу (9), на основі виразу (8), для випадку з наявною економайзерною зоною, остаточно знайдемо аналітичний вираз для шуканого часу контакту  $t_{\kappa,2}^*(h_1(\tau/\tau_{II}), H, \tau/\tau_{II})$  системи комірок II з поверхнею гріючої трубки на другому її інтервалі  $h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H$  в такому вигляді:

$$t_{\kappa,2}^*(h_1(\tau/\tau_{II}), H, \tau/\tau_{II}) = \frac{H - h_1(\tau/\tau_{II})}{v_{\text{вих}}(\tau/\tau_{II}) - v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{II})} \cdot \ln \frac{v_{\text{вих}}(\tau/\tau_{II})}{v_{\text{вх}}(\tau/\tau_{II})}, \quad (10)$$

$$h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H.$$

Об'єднуючи час  $t_{\kappa,1}^*(h_1(\tau/\tau_{II}), \tau/\tau_{II})$  перебування системи комірок на першому інтервалі  $0 \leq h \leq h_1(\tau/\tau_{II})$  гріючої трубки (рис. 3, рис. 5), який знаходиться на основі виразу (6), та час  $t_{\kappa,2}^*(h_1(\tau/\tau_{II}), H, \tau/\tau_{II})$  перебування системи комірок на другому її інтервалі  $h_1(\tau/\tau_{II}) \leq h \leq H$ , що знаходиться на основі виразу (10), остаточно отримаємо, що повний час  $t_{\kappa}^*(h_1(\tau/\tau_{II}), H, \tau/\tau_{II})$  контакту системи комірок з поверхнею гріючої трубки від точки входу в неї до точки виходу з неї з наявною економайзерною зоною становитиме:

$$t_k^*(h_1(\tau/\tau_{ц}), H, \tau/\tau_{ц}) = \frac{h_1(\tau/\tau_{ц})}{v_{вх}(\tau/\tau_{ц})} + \frac{H - h_1(\tau/\tau_{ц})}{v_{вих}(\tau/\tau_{ц}) - v_{вх}(\tau/\tau_{ц})} \cdot \ln \frac{v_{вих}(\tau/\tau_{ц})}{v_{вх}(\tau/\tau_{ц})}. \quad (11)$$

Таким чином, отримано аналітичний вираз (5) для визначення часу контакту  $t_k(H, \tau/\tau_{ц})$  системи комірок I, тобто кристалів цукру–міжкристальних розчинів сахарози–утфелью для випадку, коли швидкість від точки входу цієї системи в нижню частину вертикальної гріючої трубки до верхньої точки виходу з трубки зростає прямо пропорційно (рис. 4), і який залежить від висоти гріючої трубки  $H$  (рис. 3) та відносного часу уварювання цукрового утфелью  $\tau/\tau_{ц}$ .

Також отримано явний аналітичний вираз (11) для визначення повного часу контакту  $t_k^*(h_1(\tau/\tau_{ц}), H, \tau/\tau_{ц})$  системи комірок I та II, тобто спочатку відсутня парова фаза, а потім вона утворюється на поверхні гріючої трубки, для випадку, коли швидкість від точки входу цієї системи в нижню частину вертикальної гріючої трубки до кінця економайзерної зони (рис. 3) є постійною величиною (рис. 5), а з початкової точки зони кипіння до верхньої точки виходу з трубки (рис. 3) зростає прямо пропорційно (рис. 5). Знайдений час контакту  $t_k^*(h_1(\tau/\tau_{ц}), H, \tau/\tau_{ц})$  залежить від висоти економайзерної зони в гріючій трубці  $h_1(\tau/\tau_{ц})$ , повної висоти гріючої трубки  $H$  та відносного часу уварювання цукрового утфелью  $\tau/\tau_{ц}$ .

На основі експериментальних даних [7, 8] для окремого випадку задамо такі числові значення для швидкості входу утфелью в гріючу трубку в момент часу  $\tau/\tau_{ц} = 0,15$ :  $v_{вх}(\tau/\tau_{ц}) = v_{вх}(0,15) = 0,1$  м та в момент часу  $\tau/\tau_{ц} = 1,0$ :  $v_{вх}(\tau/\tau_{ц}) = v_{вх}(1,0) = 0,01$  м. Також на основі тих же експериментальних даних [7, 8] задамо числові значення для швидкості виходу утфелью з гріючої трубки в момент часу  $\tau/\tau_{ц} = 0,15$ :  $v_{вих}(\tau/\tau_{ц}) = v_{вих}(0,15) = 0,5$  м та в момент часу  $\tau/\tau_{ц} = 1,0$ :  $v_{вих}(\tau/\tau_{ц}) = v_{вих}(1,0) = 0,02$  м. Висоту гріючої трубки приймаємо рівною  $H = 0,98$  м, тоді час перебування комірок системи I в гріючій трубці на основі формули (5) дорівнюватиме  $t_k(H, \tau/\tau_{ц}) = t_k(0,98; 0,15) = 3,94$  с та  $t_k(H, \tau/\tau_{ц}) = t_k(0,98; 1,0) = 67,93$  с.

На основі даних [7] виберемо відносну висоту економайзерної зони при  $\tau/\tau_{ц} = 0,15$ :  $h_1(\tau/\tau_{ц})/H = h_1(0,15)/H = 0,58$  та при  $\tau/\tau_{ц} = 1,0$ :  $h_1(\tau/\tau_{ц})/H = h_1(1,0)/H = 0,92$ . У результаті при довжині гріючої трубки  $H = 0,98$  м отримаємо, що  $h_1(\tau/\tau_{ц}) = h_1(0,15) = 0,568$  м, та  $h_1(\tau/\tau_{ц}) = h_1(1,0) = 0,902$  м. Тоді час перебування комірок системи II у гріючій трубці на основі формули (11) дорівнюватиме  $t_k(H; h_1(\tau/\tau_{ц}); \tau/\tau_{ц}) = t_k(0,98; 0,568; 0,15) = 7,34$  с та  $t_k(H; h_1(\tau/\tau_{ц}); \tau/\tau_{ц}) = t_k(0,98; 0,902; 1,0) = 95,59$  с.

## Висновки

Для двох різних варіантів системи комірок: кристали цукру–міжкристальні розчини сахарози–утфелью та парова бульбашка–кристали цукру–міжкристальні розчини сахарози–утфелью при певних припущеннях знайдено аналітичні вирази (5) — для випадку відсутньої економайзерної зони та вираз (11) — для випадку наявної економайзерної зони для визначення повного часу контакту згаданих вище систем комірок з поверхнею гріючої трубки



нагрівальної камери вакуум-апарата. На основі експериментальних даних за формулами (5) та (11) для окремого випадку знайдено час контакту систем комірок I та II з поверхнею гріючої камери, що змінюється в межах від 3,94 с для  $\tau/\tau_{ц} = 0,15$  за відсутності економайзерної зони до 95,59 с для  $\tau/\tau_{ц} = 1,0$  за наявності економайзерної зони.

### **Література**

1. *Погорельий Т.М.* Математическое моделирование процесса рекристаллизации на основании аналитических решений нестационарных задач теплопроводности в двухмерном случае для прямоугольных областей с неоднородными (непрерывными и разрывными на одной из сторон) граничными условиями и неоднородными начальными условиями / Т.М. Погорельий, В.Г. Мирончук // Тезисы докладов и сообщений XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену, 10—13 сентября 2012 г. — Том 1, Часть 2.— Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2012.— С. 761—764.

2. *Погорілий Т.М.* Об'ємна геометрична модель кристалів цукру в системі комірок: кристали цукру—міжкристальні розчини сахарози—парова бульбашка // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — Т. 20, № 5.— С. 141—151.

3. *Погорілий Т.М.* Об'ємна геометрична модель міжкристального розчину сахарози в системі комірок кристали цукру—міжкристальні розчини сахарози—парова бульбашка // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — Т. 21, № 2. — С. 139—150.

4. *Погорілий Т.М.* Об'ємна геометрична модель парової бульбашки в системі комірок: кристали цукру—міжкристальні розчини сахарози—парова бульбашка // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — Т. 21, № 4.— С. 154—163.

5. *Погорілий Т.М.* Об'ємна геометрична модель системи комірок: кристали цукру—міжкристальні розчини сахарози—парова бульбашка // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — Т. 21, № 5.— С. 134—140.

6. *Попов В.Д.* Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 320 с.

7. *Тройно В.П.* Исследование теплообмена и циркуляции в процессе уваривания сахарных утфелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: КТИПП. — К., 1963. — 24 с.

8. *Интенсификация* процесса уваривания утфелей / Гаряжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р., Дидушко Б.В. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. — 152 с.

## **АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ КОНТАКТА СИСТЕМ ЯЧЕЕК С ПОВЕРХНОСТЬЮ ГРЕЮЩЕЙ ТРУБКИ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ ВАКУУМ-АППАРАТА**

**Т.М. Погорельий, В.Г. Мирончук**

*Національний університет пищевых технологий*

**К.О. Штангеев**

*Институт последипломного образования НУПТ*

*В статье представлены результаты определения полного времени контакта систем ячеек с поверхностью греющей трубки нагревательной камеры вакуум-аппарата. Определение искомого времени контакта проводилось при*

*определенных предположениях для следующих двух случаев: а) без учета экономайзерной зоны, когда скорость движения системы ячеек от точки входа в греющую трубку и до точки выхода из неё происходит по прямо пропорциональному нарастающему закону; б) с учетом экономайзерной зоны, когда скорость движения системы ячеек от точки входа в греющую трубку до конца экономайзерной зоны является величиной постоянной, а из точки начала зоны кипения и до точки выхода из греющей трубки — подчиняется прямо пропорциональному нарастающему закону. Используя полученные аналитические выражения, на основании экспериментальных данных по распределению скоростей утфеля при входе в греющую трубку и на выходе из неё для частичных случаев было найдено время контакта системы ячеек с поверхностью греющей трубки.*

**Ключевые слова:** *скорость, время контакта, высота подъема, ячейка, экономайзерная зона.*