

УДК 536.242

О.В. Глоба

O.V. Globa

М.О. Прядко, доктор техн. наук

В.З. Глоба, канд. техн. Наук

V.Z.Globa

А.В. Форсюк, канд. техн. наук, НУХТ

A.V.Forsyuk

ТЕПЛООБМІН В ПЛІВКАХ ЯБЛУЧНОГО СОКУ HEAT TRANSFER IN THE FILMS APPLE JUICE

Наведено результати аналізу теплоперенесення в пристінному шарі рідини плівкових течій в процесах випаровування та кипіння низхідних плівок яблучного соку в вертикальній трубі. Необхідність досліджень викликана потребами розроблення науково обґрунтованої методики проектування випарних установок для концентрування яблучного соку. Отримані результати доповнюють результати раніше виконаних наукових досліджень.

Ключові слова: *теплоперенесення, плівкова течія, випаровування, концентрування, яблучний сік.*

The results of the analytical studies into the boundary layer heat transfer in the falling films of apple juice at the process of evaporation have been presented.

The necessity of such studies is determined by the demand in the formulation of a scientifically proved method of industrial apple juice evaporative concentrators design. The obtained results supplement the results of earlier studies.

Key words: *heat transfer, films flow, evaporation, concentration, apple juice.*

© О.В. Глоба, М.О. Прядко, В.З. Глоба, А.В. Форсюк, 2009

Проведені експериментальні дослідження тепловіддачі в процесах випаровування і кипіння яблучного соку в вертикальній трубі. За результатами досліджень запропоновані емпіричні і критеріальні залежності для коефіцієнтів тепловіддачі [1].

В значному діапазоні режимних параметрів, для яких, згідно загальноприйнятих уявлень, має місце ламінарний режим руху рідини, інтенсивність теплообміну від внутрішньої поверхні труби до плівок яблучного соку виявилась значно більшою, ніж за результатами її розрахунку для ламінарних чи ламінарно-хвильвих режимів течій плівок. Результати наших досліджень [2] показали певні особливості структури і руху низхідних плівок яблучного соку, які позитивно впливають на інтенсивність теплообміну. Але ці особливості не відносяться до пристінного теплового шару плівки, теплогідродинамічні процеси в яких визначають інтенсивність тепловіддачі, тому лише ними не можна пояснити зростання інтенсивності тепловіддачі.

Конвективне теплоперенесення в плівках густого яблучного соку характеризуються низькою інтенсивністю. Тому значним може виявлятися внесок теплопереносу, пов'язаного з пароутворенням ще далеко від межі розвинутого кипіння плівки, тобто в зоні випаровування [3]. Порівняльний аналіз дослідних даних показує високу вірогідність наявності фазового переходу в пристінній зоні плівок яблучного соку в режимі, який за зовнішніми ознаками [4,5] відноситься до випаровування з поверхні плівки.

Щоб пояснити особливості процесів і механізмів перенесення в пристінному тепловому шарі рідини, проаналізуємо опубліковані результати виконаних досліджень плівкових течій, близьких до досліджених нами.

За даними Нішікави і Кюсюди, прямо чи опосередковано підтвердженими багатьма дослідниками [6], в тонкому тепловому шарі води, недогрітої в ядрі потоку чи в об'ємі до $\Delta t_{\text{нед}} > 12\text{K}$, парові бульбашки утворюються, швидко ростуть, а потім зменшуються і сплющуються, не відриваючись від нагрівної поверхні, тобто деградують. При атмосферному тиску і при вакуумі час деградації в кілька разів перевищує час росту. Кипіння недогрітої води при $\Delta t_{\text{нед}} < 2\text{K}$ мало чим відрізняється кипіння води в стані насичення.

Високу інтенсивність тепловіддачі при кипінні недогрітої води дослідники пояснюють особливостями механізмів перенесення теплоти в приповерхневому шарі рідини [6]. Їх декілька. Снайдер і Робін вважали, що під поверхневою бульбашкою створюється мікрошар перегрітої рідини. Він випаровується в об'єм бульбашки по площі її основи, а по площі куполу відбувається конденсація пари, передача теплоти в холодну рідину. Таким чином, поверхневі парові бульбашки, як теплові насоси, перекачують теплоту через ламінарний межовий шар, якому властивий високий термічний опір. Результати великого числа спостережень випаровування мікрошару та температурних флуктуацій нагрівної поверхні добре узгоджуються з таким механізмом теплоперенесення. Його ефективність в плівках яблучного соку уявляється нам високою.

За даними Купера і Ллойда [6] товщина мікрошару під поверхневою бульбашкою збільшується з відхиленням від центру основи і змінюється по закону $\delta_0 = \sqrt{\nu \cdot \tau}$, де ν і τ – кінематична в'язкість рідини і час росту основи парової бульбашки. В середньому для води δ_0 має порядок кількох мікрон.

Формула Купера для швидкості росту поверхневих парових бульбашок

$$R = 2,5 \frac{Ja}{Pr} (\nu\tau)^{0,5}, \quad (1)$$

де Ja і Pr – модуль Якоба і число Прандтля.

Із цієї формули тривалість росту поверхневих парових бульбашок певного розміру в середовищі яблучного соку під вакуумом, віднесена до тривалості росту бульбашок такого ж розміру у воді під атмосферним тиском

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \left(\frac{Ja_0}{Pr_0} \cdot \frac{Pr}{Ja} \right)^2 \frac{v_0}{v}, \quad (2)$$

де параметри з індексом 0 відносяться до води.

За співвідношенням (2) витікає, що парові бульбашки в середовищі яблучного соку ростуть довше, ніж у воді. При сталому вакуумі з підвищенням концентрації соку в інтервалі $CP=10...70\%$ тривалість їх росту збільшується (рис.1) на два порядки. Як бачимо, зовнішній тиск і теплофізичні властивості соку, в першу чергу в'язкість, визначають динаміку росту парових бульбашок.

Розрахункові τ_0 і δ_0 в середовищі густого яблучного соку під вакуумом в десятки разів перевершують свої значення для води при атмосферному тиску. Оцінки процесів у середовищі яблучного соку за цими розрахунками мають, очевидно, якісний характер і відображаються дещо однобоко. За високої в'язкості та низьких теплопровідності і температуропровідності істотно обмежені конвективна і молекулярна складові процесу теплоперенесення в товщу плівки. Тому в процесі локального пароутворення при концентруванні густого соку теплота накопичується в тонкому шарі рідини, прилеглому до нагрівної поверхні.

Випаровування з поверхні плівок яблучного соку підвищених концентрацій відбувається при температурних напорах, що в два і більше разів перевищують температурні напори початку кипіння в плівках води. При цьому температура нагрівної поверхні на багато вища від температури рідини на вільній поверхні плівки. Згідно з визначенням теплового шару [7] рідина, яка безпосередньо прилягає до нагрівної поверхні, має температуру близьку до температури нагрівної поверхні,

тобто істотно перегріта порівняно з температурою поверхні рідини, та знаходиться в метастабільному стані. Можна вважати, що за умов наших експериментів теплоперенесення в плівці по всій площі нагрівної поверхні відбувалося в режимі метастабільної конвекції, а в перегрітому пристінному тепловому шарі рідини складались умови для пароутворення.

Високий термічний опір конвективному теплоперенесенню в середовищі високов'язкого густого яблучного соку зумовлював криволінійний профіль розподілу температури в тепловому шарі [8,9], і значне перегрівання рідини в пристінному мікрошарі. Крім того, шорсткість нагрівної поверхні зумовлює поверхневі градієнти температури рідини навіть в стаціонарному процесі конвективного теплоперенесення. В заглибинах температура рідини вища, ніж за їхніми межами.

За загальною признаною моделлю в мікрозаглибинах нагрівної поверхні, які найсприятливіші для перегрівання рідини, під дією гетерофазних флуктуацій [10] зароджується парова фаза і ростуть поверхневі бульбашки [9]. В умовах випаровування плівок густого соку, тобто при помірних температурних перепадах і низькому тиску, вони мають бути великими і поодинокими [6,11]. Низький рівень зовнішнього тиску, відносно невеликі теплові навантаження і особливості теплофізичних властивостей соку зумовлюють повільний розвиток процесів і широку основу парової бульбашки на першому етапі її росту на центрі пароутворення.

Коли елемент перегрітої плівки, що прилягає до нагрівної поверхні, досягає температури самодовільного розпаду метастабільності, в ньому утворюється зародок парової фази, який швидко збільшується до критичного розміру за рахунок внутрішньої енергії легкої фази [12] і продукування в його порожнину пари із навколишньої перегрітої рідини. Парова бульбашка росте і витісняє рідину, створює над заглибиною

склепіння напівсферичної форми (рис.2, фіг.1). З цього моменту хвиля розпаду режиму метастабільної конвекції рухається кільцевим фронтом в перегріту навколо заглибини рідину мікрошару. Розгортання основи парової бульбашки є наслідком процесу локального розпаду метастабільного конвективного режиму теплоперенесення в перегрітому мікрошарі і пароутворення навколо заглибини. Тому бульбашка утворюється широкою, приплюснутою до поверхні труби, і плямою, „розповзається” навколо заглибини (рис.2, фіг.2 і 3). Тепер швидкий приріст об'єму пари в бульбашці відбувається в основному за рахунок периферійної зони.

Основна маса соку в плівці має меншу температуру ніж в тепловому шарі та в мікрошарі і, завдяки сильній залежності теплофізичних властивостей від температури, відрізнялася суттєво вищою в'язкістю та густиною. Піднімаючи над собою в процесі росту високов'язку рідину, поверхнева бульбашка створювала в навколишній, кільцевій зоні напруження розтягу і зрізу. Швидкий ріст бульбашки і висока в'язкість соку зумовлювали близьке до крихкого руйнування [9,8] плівкової рідини. Внутрішній тиск і сили, пов'язані з ростом парової бульбашки, викликають в навколишній рідині місцеві механічні напруження. Разом з іншими чинниками вони призводять до втрати суцільності перегрітої рідини в мікрошарі чи її відриву від нагрівної поверхні навколо заглибини, провокують масове утворення зародків парової фази в розломі і виникнення кільця нетривкої парової емульсії (рис.2, фіг.2). Швидкість утворення парової фази така висока, що вона, не встигаючи відійти в об'єм, механічно впливає на сусідній, ще метастабільний, елемент мікрошару, викликаючи пароутворення в наступному кільці [8].

Розпад метастабільного конвективного теплоперенесення в заглибині і в околицях відбувається постадійно. Під панциром холоднішої і тому міцнішої рідини пароутворення в мікрошарі послідовно охоплює

наступні кільцеві елементи і перетворює їх в парову емульсію. Рухається відцентрова хвиля пошарового розпаду метастабільної конвекції. З об'єму мікрошару може відштовхуватись майже вся рідина, а локальний паровміст зростати до 100%. За даними [8] в недогрітому толуолі при атмосферному тиску розпад емульсії і коалесценція пари в макробульбашку продовжується приблизно $(1...3) \cdot 10^{-3} \text{с}$ і майже не залежить від початкового перегріву нагрівної поверхні. В середовищі яблучного соку під вакуумом ці процеси пригальмовуються високою в'язкістю фаз та просторовим обмеженням. Тривалість життя емульсії може збільшуватися. З таким запізненням вслід за хвилиною розпаду метастабільного стану, утворення зародків парової фази і емульгування рідини мікро- та теплового шару прокочується хвиля розпаду емульсії, формування макробульбашок і сепарації рідини. Сепарована рідина частково повертається на нагрівну поверхню, частково приєднується до основної плівкової маси.

Аналіз показує, що в плівкових течіях густого яблучного соку можливості для спливання парових бульбашок на поверхню рідини обмежені. У тихоплинній плівці густого соку парові бульбашки на центрах пароутворення протягом першого періоду росту перебувають в оточенні перегрітої рідини і не повинні втрачати значної кількості теплоти. Усім її акумульованим в мікрошарі запасом продукується пара. За нашою оцінкою під діючим в дослідах температурним напором перегрітий мікрошар соку може продукувати 1...2 % пари від своєї маси. Виходячи з об'єму пари, віднесеного до площі основи бульбашки, товщина парової плями дорівнює 0,5 мм і більше. В середньому на таку висоту пара повинна підняти рідину по всій площі основи, надавши їй сильний динамічний імпульс. В дійсності пара перетікає під центральний купол і основа парової бульбашки згортається. На цьому етапі розмір поверхневої парової бульбашки вказаного об'єму мав би щонайменше в 2 рази перевершувати товщину плівки, що неможливо. Вмістивши не

більше половини кількості пари, яка утворюється за один локальний цикл розпаду метастабільного стану рідини в мікрошарі, парова бульбашка стає сумірною з товщиною плівки. Ще утримуючись на центрі пароутворення і залишаючись в тепловому контакті з нагрівною поверхнею такі парові бульбашки своїми вершинами повинні виступати над поверхнею плівки.

Переростаючи товщину плівки парова бульбашка створює над собою локальний вигин поверхні рідини (рис.2, фіг.3). Піднята рідина стікає під дією гравітаційних і капілярних сил, подібно до того, як витікає рідина по каналах Плато-Гібса [13]. Шар рідини над паровою сферою потоншується швидко і мав би перетворитися в оболонку мікроскопічної товщини. Наприклад, в квазістатичних умовах сотових пін [14] може витікати вся міжповерхнева рідина, а оболонка потоншуватись майже до двох мономолекулярних шарів поверхнево-активних речовин.

Через зовсім тонкі плівки спрямовуються потужні теплові потоки навіть при невеликих перепадах температури. Тому тонка оболонка на вершині парової бульбашки мала б забезпечувати на діючому центрі інтенсивне локальне випаровувально-конденсаційне теплоперенесення за схемою теплового насоса. При цьому швидкісний потік пари від нагрівної поверхні діє на плівку як динамічне навантаження, тим сильніше, чим тоншою вона стала б. На внутрішній поверхні оболонки конденсується пара, із зовнішньої випаровується вода. Діють градієнт концентрацій, поперечний потік маси і додаткове силове навантаження в плівці.

Нами встановлено, що яблучний сік при кипінні не утворює тривкої піни, плівки навколо диспергованої парової фази неміцні. Для яблучного соку не міцні і недовготривалі, також, оболонки на вершинах парових бульбашок. Вони руйнуються ще досить товстими, обумовлюючи значний термічний опір. Зазначені обставини обмежують інтенсивність локальної тепловіддачі та витрати теплоти і пари із парових бульбашок.

Тому бульбашки відносно швидко ростуть і пробиваються вершинами за рівень вільної поверхні плівки. Завдяки високому рівню і динамізму навантажень в неміцній оболонці над паровою сферою утворюється отвір.

Парова бульбашка перетворюється у відкриту в ядро потоку пору на центрі пароутворення (рис.2, фіг.4). Акумуляованої в перегрітій рідині теплоти залишається ще більше половини, триває кондуктивне підігрівання рідини мікрошару. Продукування пари продовжується, але вона витікає через отвір в мікроплівці швидше, ніж до цього конденсувалася. Час деградації бульбашки і період циклу значно скорочуються.

Параметри пари у відкритій порі знижуються до тиску і температури насичення в ядрі потоку. Рідина поверхні пори охолоджується, її в'язкість зростає. Коли вичерпується теплота локального перегріву рідини, пара може заповнюватися рідиною. Повне заповнення западини густим соком малоймовірне. Скоріше за все густим слабоплинним соком в западині накривається затравочний об'єм парової фази. Наступний акт пароутворення на цьому центрі починається не з порушення суцільності рідини і утворення каверни, а з її росту.

В роботі [8] аргументовано стверджується, що сильна доза звукової енергії виділяється в момент утворення в рідині каверни і злиття в неї пари з надзвуковою швидкістю. Якщо в западині залишається затравочна парова фаза, чи западина хоч би частково заповнюється емульсією, то наступний акт пароутворення відбувається без потужного звукового супроводження. При описаній вище багатостадійності і затягнутості в часі процесів пароутворення на діючому центрі швидкості зливання пари в бульбашку не можуть досягати критичних значень. Крім того, в емульсії дисипує звукова енергія. Складається враження, що пароутворення відсутнє. Насправді воно відбувається безпосередньо на нагрітій поверхні, але не виявляється ні візуально ні акустично.

Таким чином, в зоні випаровування з вільної поверхні низхідних плівок яблучного соку безпосередньо на нагрівній поверхні існують поряд елементарні ділянки однофазної метастабільної конвекції і пароутворення. При сталому навантаженні їх співвідношення залишається приблизно сталим, а положення і межі безперервно змінюються і перебудовуються. На кожній ділянці нагрівної поверхні процес протікає суттєво нестационарно і локальний режим теплопередачі перебуває в стані постійних змін стадій розпаду і відновлення метастабільності. Нестационарність локальних теплогідродинамічних процесів забезпечує механізми інтенсивного теплоперенесення і високі коефіцієнти тепловіддачі [7, 8], але не знаходить відображення у відомих розрахункових залежностях.

Висновки. Наведено аналіз процесів теплоперенесення в пристінному шарі низхідних плівок при випаровуванні під вакуумом яблучного соку, що стікає по внутрішній поверхні вертикальної труби. Запропоновано фізичне обґрунтування високоефективного механізму теплоперенесення в зоні випаровування густого яблучного соку, в основу якого покладено гідродинамічні особливості руху плівок, наявність і особливості фазового переходу в пристінному шарі рідини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Глоба О.В., Прядко М.О., Форсюк А.В. Тепловіддача в процесах концентрування низхідних плівок яблучного соку в вертикальних трубах.// Наукові праці НУХТ– №16.– 2005. С. 131– 137.
2. Глоба О.В., Прядко М.О., Форсюк А.В. Теплоперенесення в плівках яблучного соку.// Харч. пром-сть.- №4.- С. 102-105.
3. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных плёнках.–К.: Техніка, 1972.– 196 с.
4. Исследование режимов парообразования в стекающей плёнке жидкости методом акустической диагностики./ Тобилевич Н.Ю.,

Ардашев В.А., Прядко Н.А., Король Н.Н.// Изв. вузов СССР. Энергетика.– 1984.– №12.– С. 63–67.

5. Ардашев В.А. Исследование теплообмена при выпаривании гравитационно стекающей плёнки жидкости в вертикальных трубах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/КТИПП. – К., 1983. – 26 с.

6. Несис Е.И. Кипение жидкостей. – М.:Наука, 1973. – 279 с.67.

7. Исаченко В.П. , Осипова В.А. , СукомелА.С. Теплопередача – М-Л: Энергия, 1965- 424с.

8. Жуков С.А., Барелко В.В. Динамические и структурные особенности процессов распада метастабильного режима однофазной конвективной теплопередачи и формирования пузырькового кипения (Препринт)- Черноголовка, 1987, 32с.

9. Скрипов В.П., Синицын Е.Н.,Павлов П.А. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии.-М.: Атомиздат, 1980 – 208с.

10. Кулінченко В.Р., Зав'ялов В.Л. Виникнення парової фази на тепловіддавальній поверхні.// Наукові праці НУХТ– №15.– 2004. С. 93–95.

11. Шекриладзе И.Г. Основные механизмы теплоотвода в процессе развитого кипения // Двухфазные потоки. Теплообмен и гидродинамика. Л.:Наука. Ленингр.отд-ние, 1987. с. 30-49.

12.Толубинский В.И. Кипение жидкостей.- К.: Наукова думка, 1980. –316с.

13. Шелудко А., Ексерова Л., Платиканов Д. Кинетика утончения и разрыва тонких слоев жидкости. – Коллоидный журнал, 1963, Т.25, вып.5, с.606-612

14. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика Их получения и разрушения. – М.:Химия, 1983. – 264 с.

10	0,142635
20	0,206468
30	0,336629
40	0,630493
50	1,392432
60	4,386792
70	23,06092

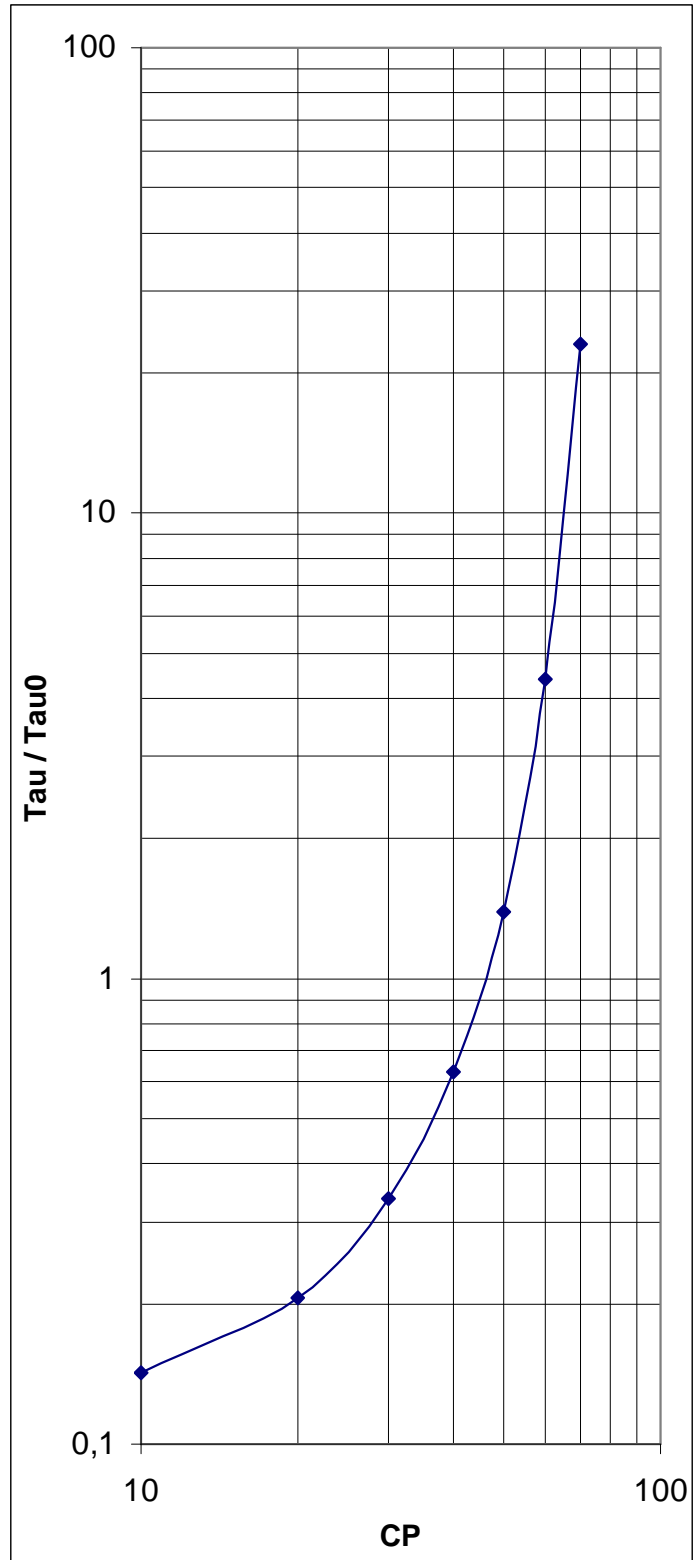
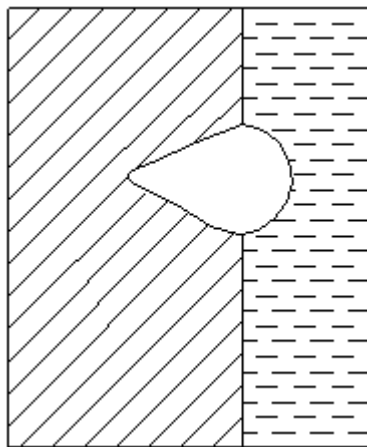
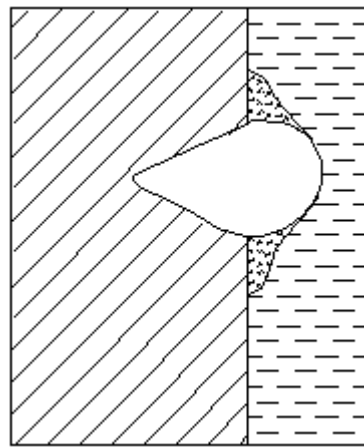


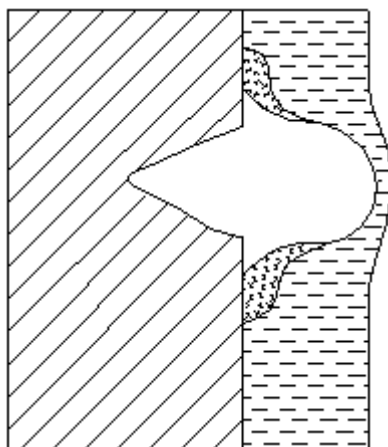
Рис.1. Час росту парової бульбашки



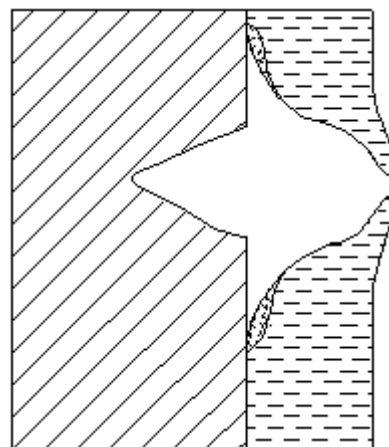
фіг. 1



фіг. 2



фіг. 3



фіг. 4

Рис. 2. Ріст макробульбашки на діючому центрі.

Одержана редакційною колегією 20.3.2009 р.

Відомості про авторів

Глоба Олександр Вікторович, інж. Вінницький ОЖК, т.35-33-90, м. Вінниця, вул. Писарєва 7/43;

Глоба Віктор Зіновійович, к.т.н., Чернівецький ОЖК, т.55-26-51, Чернівці, вул. Моріса Тореза, 26;

Прядко Микола Олексійович, д.т.н., проф., Національний університет харчових технологій, т.287-92-85, Київ, вул. Фрунзе 131, кв. 104.

Форсюк Андрій Васильович, к.т.н., доц. Національний університет харчових технологій, т.287-96-65, Київ, вул. Шкільна 14, кв.2.