

УДК 536.242

О.В. Глоба
М.О. Прядко, д-р техн. наук
В.З. Глоба, А.В. Форсюк,
кандидати техн. наук

ТЕПЛОВІДДАЧА В ПРОЦЕСАХ КОНЦЕНТРУВАННЯ НИЗХІДНИХ ПЛІВОК ЯБЛУЧНОГО СОКУ У ВЕРТИКАЛЬНИХ ТРУБАХ

Наведено результати експериментальних досліджень тепловіддачі в процесах випаровування та кипіння низхідних плівок яблучного соку у вертикальній трубі. Необхідність досліджень зумовлена потребами розроблення і проектування установок для концентрування яблучного соку. Отримано дані щодо закономірностей тепловіддачі, які потрібні для науково обгрунтованого створення випарних установок фруктових соків.

Ключові слова: *тепловіддача, концентрування, випаровування, плівка*

The results of experimental studies into the heat transfer in the processes of evaporation and boiling of falling apple juice films in a vertical pipe. The study is determined by the necessity in desing and development of evaporators for apple juice concentration. The data on the heat transfer mechanism obtained in this study will be used in the scientifically proven designing of fruit juice concentrators.

Key words: *heat transfer, consenttatoin, evaporation, biem*

Необхідність досліджень, результати яких аналізуються нижче, зумовлена потребами розроблення технологічного процесу і випарних установок (ВУ) для концентрування яблучного соку. На попередніх етапах [3 і 4] проведено дослідження тепловіддачі і гідравлічного опору при випаровуванні низхідних плівок яблучного соку у вертикальних трубах. Результати досліджень подано у вигляді емпіричних залежностей і використано під час розроблення і проектування випарних установок яблучного соку для Чернівецького ОЖК. Характерна особливість таких ВУ – невеликі температурні напори і випаровування із зовнішньої поверхні плівки без кипіння (ВУ з "м'яким" температурним режимом). Альтернативні випарні установки з "жорстким" температурним режимом характеризуються високими тепловими потоками, при яких відбувається кипіння рідини в плівці. За цих обставин у довготрубних випарних апаратах мають місце високі швидкості вторинної пари, спроможні впливати на формування двофазного потоку в трубі, на параметри плівок та механізми переносу і, як наслідок, на інтенсивність тепловіддачі.

Мета роботи – дослідити теплогідродинамічні (ТГД) процеси під час кипіння яблучного соку, який у вигляді плівки стікає по внутрішній поверхні вертикальної труби при супутному, одно-напрявленому русі вторинної пари. Значним діапазоном концентрацій соку визначився широкий діапазон змінення його теплофізичних властивостей (ТФВ), серед яких в'язкість змінюється більше ніж на два порядки, а критерій Прандтля – майже на три порядки. При цьому істотно змінюються режими руху фаз і їхня взаємодія, механізми перенесення та інтенсивність тепловіддачі.

Експериментальні дослідження виконували на однотрубній моделі випарного апарата (ВА) плівкового типу. Дослідна труба внутрішнім діаметром 32 мм і 3,6 м завдовжки розділена на шість ділянок 600 мм завдовжки кожна [3].

Умови дослідження максимально наближені до умов роботи промислових ВА яблучного соку і характеризуються такими показниками: тиск вторинної пари в сепараторі $P_0 = 0,01...0,06$ МПа; масова частка сухих речовин у соку $CP_0 = 15...70$ %; щільність зрошення $\Gamma_y = (8...60) \cdot 10^{-5}$ м²/с; густина теплового потоку $q = 5...60$ кВт/м²; швидкість вторинної пари $W_c = 0...160$ м/с.

Експериментальні дані обробляли за методикою, описаною в попередніх роботах авторів [3, 4], і аналізували, порівнюючи з результатами досліджень інших авторів.

Значення експериментально отриманих локальних коефіцієнтів тепловіддачі α_2 якісно узгоджуються з результатами досліджень теплообміну в плівках яблучного соку і аналогічних розчинів [1, 2]. Підтвердився характер залежності $\alpha = f(q)$, в якій виділяються зона випаровування, перехідна зона і зона розвинутого кипіння плівки. Первинний аналіз процесів теплообміну в зоні випаровування та апроксимацію результатів емпіричною залежністю від концентрації соку і тиску вторинної пари подано в роботі [3]. Поглиблений аналіз дає змогу виконати узагальнення в критеріальній формі.

У зоні випаровування з вільної поверхні плівки теплота від поверхні труби до зовнішньої поверхні плівки переноситься завдяки теплопровідності і конвекції. В обмеженому діапазоні щільності зрошення механізм теплопровідності реалізується на молекулярному рівні і в наших дослідах проявляється підвищенням α_2 в разі зменшення Γ_y , тобто товщини плівки δ . Умови, коли в плівці домінує теплопровідність, у промислових випарних апаратах витримуються рідко. Реальні режими навантаження майже завжди передбачають наявність механізму конвективного перенесення, який зумовлює вищу інтенсивність теплообміну, ніж теплопровідність.

У зоні випаровування основними чинниками, що визначають інтенсивність теплообміну, є товщина, швидкість і режим руху плівки рідини на поверхні теплообміну, загалом – її структурні характеристики. В ряді робіт через них визначають інтенсивність

тепловіддачі. У своїх дослідах ми контролювали і забезпечували процес за витратними параметрами і ТФВ соку.

Відповідно побудована модель аналізу і апроксимації експериментальних даних з теплообміну. Виразником ТФВ є критерій Прандтля

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu c_p \rho}{a} \quad (1)$$

Частку участі кожного із згаданих вище механізмів перенесення враховують критерієм Пекле

$$\text{Pe} = \frac{\overline{\omega} \delta}{a} = \frac{\Gamma_v}{a} \quad (2)$$

Результати досліджень випаровування з поверхні плівки виражають [2, 5] критеріальною залежністю

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_2 \overline{\delta}}{\lambda} = A \text{Pe}^n \text{Pr}^m. \quad (3)$$

У формулах (1) і (2) параметри ТФВ позначено загальноприйнятими символами, а значення швидкості рідини в плівці ω і товщини плівки δ ми визначали через зовнішні характеристики (параметри) течії залежно від гідродинамічних умов у трубі за методикою роботи [4].

Результати наших експериментальних досліджень показують чітке розшарування даних на графіку залежності $\text{Nu} = f(\text{Pe})$ за числом Pr , тобто за ТФВ соку (рис. 1). Але при всіх значеннях числа Pr лінії графіків прямі чи близькі до прямих і мають майже (практично) однаковий нахил. Вони вказують на те, що $n = 0,67$.

Графік залежності $\text{Nu}/\text{Pe}^{0,67} = f(\text{Pr})$ має складну форму (рис. 2). Це природно. На графіку наведено дані для соку з масовою часткою $\text{CP} = 10...70\%$ на вході в трубу. Діапазон змінення значення числа Pr наближається до трьох порядків.

Складна форма лінії графіка (рис. 2) наближено описується в усій зоні змінення числа Pr відносно простою залежністю

$$m = -0,15 + 7,5 \cdot 10^{-5} (\text{Pr} - 200),$$

а формула для розрахунку тепловіддачі в зоні випаровування низхідних плівок яблучного соку набуває вигляду

$$\text{Nu} = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{Pe}^{0,67} \text{Pr}^{-0,15+7,5 \cdot 10^{-5} (\text{Pr}-200)}. \quad (4)$$

Формула придатна для розрахунку теплообміну в коротко- і довготрубних випарних апаратах при абсолютному тиску до 0,01 МПа і щільності теплових потоків від 5 до 25 кВт/м² відповідно для соку з діапазоном концентрацій 10...70%. Це практично вся зона роботи ВУ з "м'яким" температурним режимом.

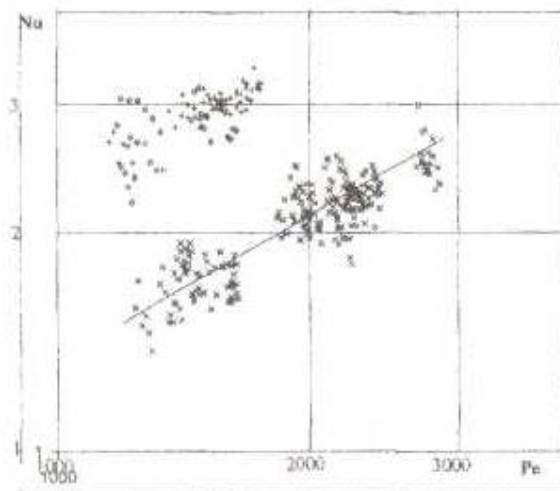


Рис. 1. Тепловіддача в зоні випаровування
 x — $P_0 = 0,12$ бар, $Pr = 100 \dots 800$;
 o — $P_0 = 0,3$ бар, $Pr = 10 \dots 15$;
 + — $P_0 = 0,45$ бар, $Pr = 6 \dots 7$

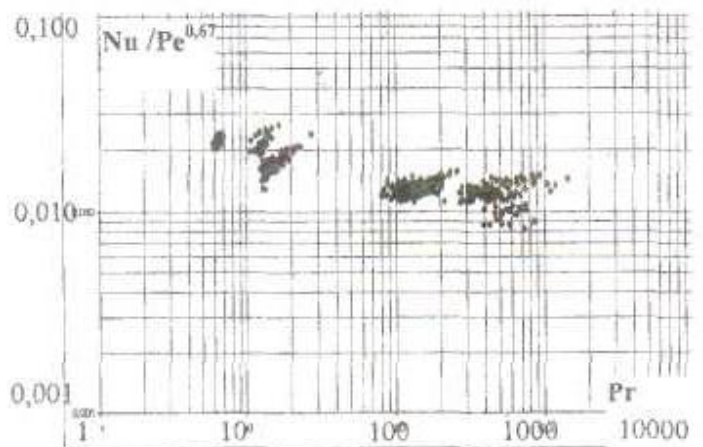


Рис. 2. Залежність $Nu/Pe^{0,67} = f(Pr)$

При підвищених температурних напорах і теплових потоках у трубі встановлюється режим бульбашкового кипіння соку в плівці, який характеризується утворенням бульбашок пари на поверхні теплообміну і рухом їх до поверхні плівки. З бульбашками пари від поверхні труби виноситься значна кількість теплоти. Крім того, бульбашки переміщують рідину в плівці і посилюють конвективну складову теплоперенесення. Так чи інакше, все теплоперенесення у процесі кипіння пов'язане з утворенням і рухом парових бульбашок. Ними плівка турбулізується і набухає.

Всі методи визначення товщини плівки та інших її параметрів стають малонадійними. Тому за основний характерний лінійний розмір під час кипіння, зокрема й під час кипіння плівки, беруть діаметр середньостатистичної парової бульбашки на момент відриву. Значення його теоретично обґрунтовано і визначається через теплофізичні константи рідини і пари, взяті для робочих умов:

$$l = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} ,$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, кг/с²; ρ' і ρ'' – густини соку та сокової пари, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Специфічні критерії, які використовують для узагальнення інтенсивності теплообміну в процесах кипіння, відображають виникнення парової фази в разі змінення агрегатного стану розчинника (води) і включають як лінійний розмір величину l . Дослідні дані в критеріальній формі узагальнюються в системі Кичігіна-Тобілевича

$$Nu = C Pe_k^n Ga^{0,135} K_p^{0,7} . \quad (5)$$

Зокрема, рівняння для визначення оптимальних коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні яблучного соку в низхідній плівці під вакуумом на внутрішній поверхні короткої труби має вигляд

$$Nu = 4,29 \cdot 10^{-4} Pe_k^{0,6} Ga^{0,064} K_p^{0,77} . \quad (6)$$

У рівняннях (5) і (6): $Nu = \frac{\alpha_2 \lambda}{l}$ – критерій Нусельта; $Pe = \frac{ql}{\rho'' r a}$ – критерій

Пекле; $Ga = \frac{gl^3}{\nu^2}$ – критерій Галілея; $K_p = \frac{pl}{\sigma}$ – критерій тиску.

Рівняння (5) і (6) емпіричні. Коефіцієнти і показники степенів у них треба уточнювати залежно від ТФВ розчинів і умов роботи. Крім того, рівняння не враховує впливу на теплообмін парового потоку. В коротких трубах [1] цей вплив не був значним, тому що невеликою була швидкість пари. В довгих трубах впливом на теплообмін парового потоку знехтувати неможливо. Рівні теплового потоку, що спроможні забезпечити кипіння плівки, на значній частині довгої труби зумовлюють швидкості вторинної пари, які здатні суттєво впливати на процес теплообміну і його інтенсивність.

Найпростіше враховувати це безпосередньо зведеною швидкістю парового потоку W_0'' , як, наприклад, у роботі [2]. Але в досліджуваних нами умовах роботи ВУ під вакуумом посилена залежність від тиску, густини та кінематичної в'язкості пари, і лише сама швидкість W_0'' не повною мірою відображає результат взаємодії парового ядра з плівкою рідини.

Більш відповідним параметром, ніж W_0'' , для наших умов є критерій Рейнольдса пари, зведений до діаметра труби d :

$$Re_n = \frac{d W_0''}{\nu''} .$$

Одержані нами експериментальні дані задовільно узагальнюються залежністю

$$\text{Nu} = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{Re}_k^{0,63} \text{Ga}^{0,1} \text{K}_p^{0,7} \text{Re}_n^{0,12}. \quad (7)$$

Розбіжності розрахованих за формулою (7) і дослідних даних рідко досягають 13 %, тобто не виходять за межі точності експерименту.

На цьому можна вважати завершеним проведене нами дослідження всієї зони роботи промислових ВУ. Результати аналізу показали, що випарні апарати для ВУ з "м'яким" температурним режимом і з корисною різницею температур у плівці не більше ніж 6...8 К можна розраховувати за формулою (4) для зони випаровування. При більших корисних температурних напорах, що відповідають перехідній зоні, коефіцієнти тепловіддачі слід розраховувати паралельно за формулами (4) і (7) і брати більше значення. Такий підхід дасть для початкової ділянки перехідної зони дещо занижені результати. Проте загальний результат розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в довгій трубі не матиме суттєвої похибки, оскільки розміри перехідної зони в трубі обмежені.

Початком зони кипіння формально можна вважати межу, за якою результати розрахунків за формулою (7) стають систематично вищими, ніж у зоні випаровування. Потреба у паралельних розрахунках за формулою (4) відпадає.

Побудовані за такими принципами розрахункові методики придатні для проектних та інших інженерних розрахунків ВА яблучного соку для вакуум-випарних установок з усіма можливими в практиці температурними режимами.

Висновки. Проведено дослідження ТГД-процесів тепловіддачі, під час випаровування і кипіння яблучного соку, що стікає в плівці по внутрішній поверхні вертикальної труби при супутному потоці пари. Вперше досліджено зону високих концентрацій соку і тиску вторинної пари, нижчого за 0,3 бар. Результати досліджень подані в критеріальній формі і використані при розробленні промислової випарної установки на Чернівецькому ОЖК.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аношин И.М., Моисеев А.М. Теплопередача при кипении плодовых соков в пленочных аппаратах// Изв. вузов СССР. Пищ. технология.– 1965.– №5.– С.161-164.
2. Ардашев В.А. Исследование теплообмена при вышаривании гравитационно стекающей пленки жидкости в вертикальных трубах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/КТИПП.– К., 1983. – 26 с.
3. Глоба О.В., Прядко М.О., Глоба В.З. Форсюк А.В. Тепловіддача при випаровуванні плівок яблучного соку// Наук. пр. НУХТ. — 2003. — №14. — С. 29-31.
4. Глоба О.В., Прядко М.О., Форсюк А.В. Втрати тиску в процесі випаровування плівок

яблучного соку// Наук. пр. НУХТ.-2004. — №16. — С. 29-31.

5. *Тананайко Ю.М., Воронцов Е.Г.* Методы расчета и исследования пленочных процессов. — К.: Техніка, 1975. — 312 с.

Надійшла до редколегії 07.02.05 р.