

О.В. Глоба,

М.О. Прядко, д-р. техн. наук

В.З. Глоба, А.В. Форсюк — канд. техн. наук

ТЕПЛОВІДДАЧА ПРИ ВИПАРОВУВАННІ ПЛІВОК ЯБЛУЧНОГО СОКУ

Концентрування фруктових соків є дуже актуальним питанням для України. Технологічний процес здійснюють у вакуум-випарних установках з прямоотечійно-плівковими випарними апаратами (ППВА). Оскільки в них немає гідростатичної депресії і рідина перебуває під дією підвищеної температури нетривалий час, це дає змогу зберігати харчову і товарну цінність продукту та створювати економічні багатоступеневі ВУ за умов обмеженого температурного перепаду на них.

Дані про теплогідродинамічні (ТГД) процеси в ППВА фруктових соків обмежені, рекомендовані залежності для розрахунку тепловіддачі не охоплюють реальних режимних параметрів. Майже зовсім не досліджено зону високих концентрацій і тиску, нижчого ніж 0,3 бар (вакууму), які відповідають умовам кінцевого ВУ. Існуючі результати досліджень цієї зони через їх обмеженість практично не можна використати для розроблення випарних апаратів. Усе це зумовило необхідність проведення експериментальних досліджень.

Мета роботи – дослідити ТГД процеси при випаровуванні яблучного соку, який у вигляді плівки стікає по внутрішній поверхні парогенерувальних труб ППВА, зокрема встановити залежність інтенсивності теплообміну від геометричних, режимних параметрів та теплофізичних властивостей соку і визначити оптимальні теплогідродинамічні умови технологічного процесу.

Дослідження проводили на однотрубній моделі ППВА в схемі діючої ВУ. Дослідна труба внутрішнім діаметром 32 мм складалася з шести відрізків (ділянок) по 600 мм завдовжки й обігрівалася сухою насиченою парою. Кожна ділянка обладнана чашечками для збирання конденсату, імпульсними трубками п'єзометрів і мідь-константановими термопарами.

Зона досліджень характеризується такими параметрами: тиск пари в сепараторі $p_0 = 0,1 \dots 0,6$ бар, масова частка сухих речовин у соку $CP = 15 \dots 70$ %; щільність рошення $\Gamma_v = (8 \dots 60) \cdot 10^{-5}$ м²/с, тепловий потік $q = 5 \dots 40$ кВт/м². швидкість вторинної пари $W_0'' = 0 \dots 160$ м/с. Основний масив досліджень виконували за планом наведеним у *табл.1*. Такий план досліджень зумовлений необхідністю прискорити розроблення і проектування випарної установки.

Таблиця 1

p_0 , бар	CP_0 , %	q , кВт/м ²	W_0'' , м/с
0,12	56, 65, 70	5...40	0,3...50
0,30	15, 26, 42, 65	5...40	0,1...20
0,45	26, 42	8...20	0,1...20
0,60	15, 25	10...25	0,1...20

Спочатку провели дослідження при випаровуванні води, результати яких добре узгоджуються з результатами інших авторів.

Важливим питанням попередніх досліджень був визначення кількості газів, що виділяються при підігріванні та випаровуванні соку. Процеси оцінювали за темпом накопичення газів, що не конденсуються, в підігрівнику соку і в поверхневому конденсаторі вторинної пари. Щоб можна було порівняти дані та врахувати фон, послідовно провели серію дослідів із живленням установки холодними (аерованими) і гарячими конденсатом та соком. Виходи газів при деаерації в підігрівнику якісного (неперестояного) соку і холодного конденсату приблизно однакові, В газах, що виділяються при підігріванні соку, є незначні

домішки ароматичних речовин. Практично всі розчинені в соку газу і більша частина ароматичних сполук переходять у парову фазу і виносяться першими дозами випару, маса яких становить 5...8 % від маси соку. За результатами досліджень добре ущільнена система нормально працювала при величині втрат пари на здування з несконденсованими газами в межах 0,2...0,3 % від витрат пари в підігрівник.

У серії попередніх дослідів перевірено вплив на процес щільності зрошення труби соком з $CP = 6...60$ %. Надійне зрошення без кризових явищ забезпечувалося при $\Gamma_v = (8...10) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. В інтервалі $\Gamma_v = (20...30) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ залежність коефіцієнта тепловіддачі від щільності зрошення слабка, а при $CP_0 > 56$ % її майже зовсім немає. Тому основний масив досліджень виконували в інтервалі $\Gamma_v = (20...30) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, характерному для роботи промислових апаратів.

На вході в трубу підтримували температуру соку, що відповідає стану насиченої пари в розподільній камері, чим виключався вплив недогрівання соку на процес теплообміну в трубі.

Аналіз розподілу по довжині труби експериментально визначених локальних теплогідродинамічних характеристик, які характеризують процес випаровування з поверхні плівок яблучного соку, що гравітаційно стікають, показав неоднозначний характер змінення, взаємозв'язків і впливу їх на інтенсивність тепловіддачі. Локальні значення коефіцієнта тепловіддачі визначаються локальними гідродинамічними параметрами потоку і теплофізичними властивостями соку. В дослідній зоні при достатньому зрошенні поверхні дослідної труби на коефіцієнт тепловіддачі найсильніше впливають концентрація соку і тиск вторинної пари. Згідно з методикою за двома цими факторами визначали теплофізичні константи соку в плівці. Тобто в дослідженій зоні визначальними параметрами процесу є теплофізичні властивості соку. В зоні високих значень вмісту CP і низьких t_0 (p_0) вплив теплофізичних властивостей посилюється і перебиває вплив інших факторів.

Залежність локальних коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_2 = f(q)$ показано на *рис 1*. Якісно зона узгоджується з даними авторів, що працювали а яблучним соком і подібними розчинами [1 – 3]. Дані на графіку розшаровуються за CP_0 і p_0 , тобто за теплофізичними властивостями соку. За характером кривих графіка виділяються зони випаровування, перехідна і розвинутого кипіння плівки.

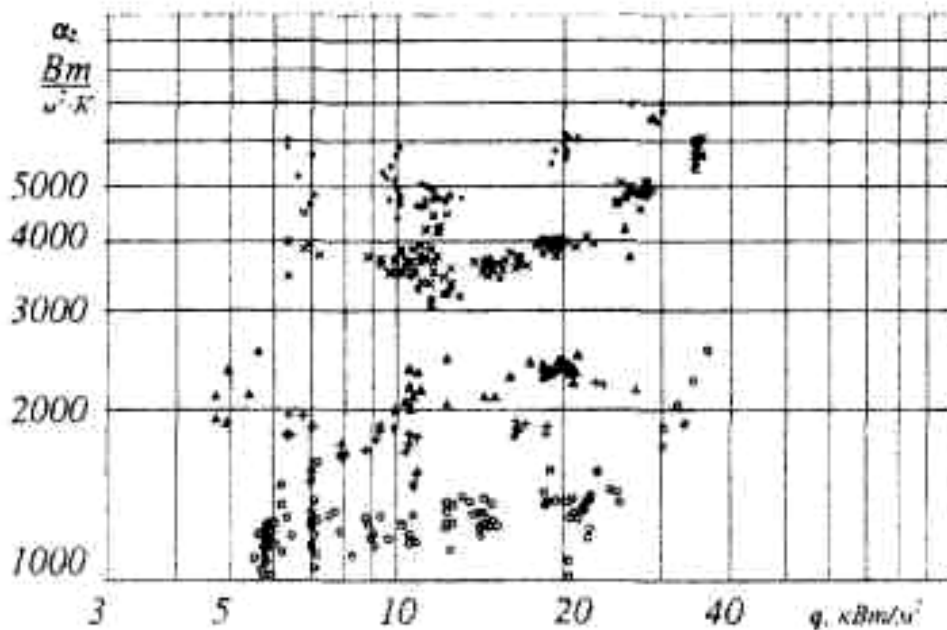


Рис. 1. Залежність $\alpha_2 = f(q)$:
 $P_0 = 0,3$ бар, $CP, \%$: \bullet — 15; \times — 26; \blacktriangle — 42; $+$ — 62

Зона незалежності α_2 від q , в якій домінує конвективний перенос теплоти, обмежується температурним напором 5...6 °С. Відповідно обмежено теплові потоки, швидкість пари і вплив парового потоку на процеси масо- і теплопереносу. Отже, з параметрів , які змінювалися в дослідях, у зоні конвективного переносу залишаються впливовими концентрація соку і тиск вторинної пари.

Порівняльний аналіз дослідних даних з результатами розрахунків за залежностями Струве [4] показав, що в усьому діапазоні витратних параметрів дослідні коефіцієнти тепловіддачі перевершують дані розрахунку для ламінарної течії плівки. Різниця дослідних і розрахункових характеристик збільшується із зростанням витратних параметрів потоку. У всій дослідженій зоні, навіть при зовсім малих значеннях чисел Рейнольдса плівки яблучного соку, домінує

конвективний перенос теплоти і маси. Тобто режим течії плівки був турбулентний або перехідний.

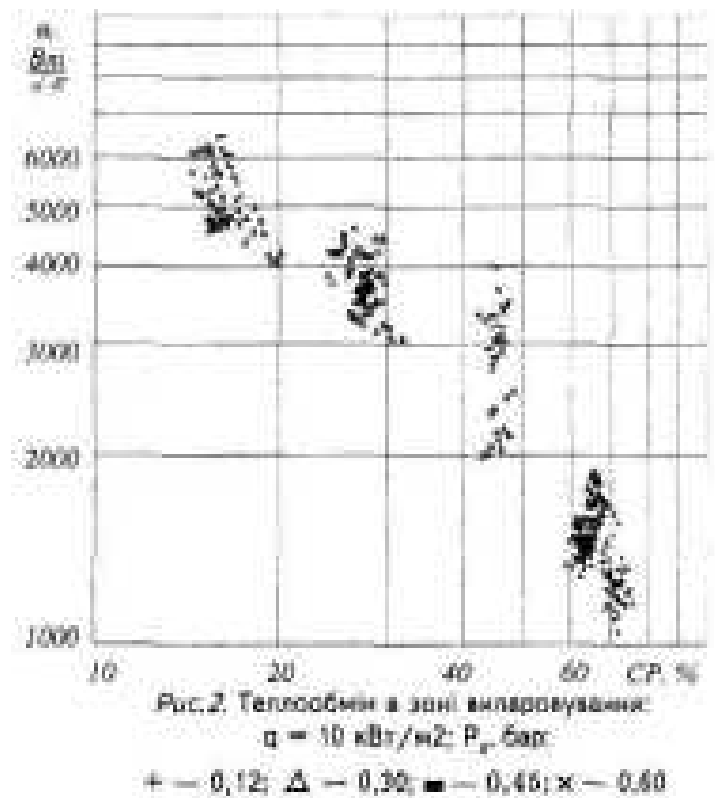
Збіг дослідних даних з результатами розрахунків, наведених у праці [4] для перехідної і турбулентної плівок соку концентрацією приблизно до 45 %, можна вважати задовільним, хоча й із значними застереженнями. Це зона пропорційного підвищення в'язкості за концентрацією соку. З початком прискореного зростання в'язкості соку і значних змін інших його теплофізичних констант за межею $CP = 45\%$ дослідні дані значно відрізняються від розрахункових. Різниця швидко зростає за концентрацією. Властивості соку стають найвизначнішим фактором пренесу, а вплив режимних параметрів – малосуттєвим. Зона високих концентрацій яблучного соку є особливою зоною, відмінною від зони середніх і низьких концентрацій, і не має навіть далеких кореляцій з відомими даними. Експериментальні дослідження в цій зоні вкрай обмежені. Сік відрізняється високою в'язкістю. Відповідно відрізняються ТГД процеси та інтенсивність тепловіддачі. Значення чисел Прандтля і Рейнольдса виходять далеко за межі коректності відомих розрахункових залежностей. Можливість інтерполяції виключається.

Аналіз отриманих дослідних даних порівняно з результатами опублікованих іншими авторами досліджень тепловіддачі при випаровуванні з поверхні плівок, які гравітаційно стікають у трубах, показує значні розбіжності. Поширення їхніх результатів на роботу випарних апаратів яблучного соку неможливе. Рекомендовані ними залежності для розрахунку тепловіддачі дійсні лише в обмежених зонах, для яких вони отримані.

Наші дослідні дані за α_2 задовільно узгоджуються з окремими результатами досліджень [1]. В роботі [1] досліджували кипіння плівок фруктових соків у короткій трубці діаметром 50 мм при теплових потоках 12...80 кВт/м². Запропоновані розрахункові залежності не є коректними для зон випаровування і перехідної.

На графіку *рис.2*, побудованому за нашими експериментальними даними, виділяються дві зони пропорційної залежності $\alpha_2 = f(CP)$ при

випаровуванні і перехідна зона між ними. Ступінь залежності α_2 від CP в зонах рідкого і згущеного соку, розмежованих концентрацією 40...45 % CP , різна.



Аналіз графічної залежності *рис.2* дав змогу апроксимувати дослідні дані емпіричною формулою, зручною для теплотехнічних розрахунків при розробленні та проектуванні випарних апаратів: $\alpha_2 = A(CP)^n$

Показники степенів n і коефіцієнти A , обчислені за дослідними даними для обох пропорційних зон, наведено в *табл. 2*.

Таблиця 2

P_0 , бар	A_1	n_1	A_2	n_2
0,12	—	—	780	-1,34
0,30	1520	-0,62	960	-1,34
0,45	1880	-0,56	—	—
0,60	2077	-0,53	—	—

Перехідну зону розраховують методом інтерполяції з пропорційних зон. Точність наведеної формули достатня для проектних розрахунків випарних апаратів при теплових потоках до 20 кВт/м^2 .

Висновки. Проведено дослідження ТГД процесів тепловіддачі при випаровуванні яблучного соку, що у вигляді плівки стікає по внутрішній поверхні вертикальної труби при супутному потоці пари. Вперше досліджено зону високих концентрацій соку і тиску вторинної пари, нижчого ніж 0,3 бар. Результати досліджень подано емпіричною залежністю $\alpha_2 = f(CP)$ і використано при розробленні промислової випарної установки на Чернівецькому ОЖК.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Аношин ИМ., Моасеев АМ.* Теплопередача при кипении плодовых соков в пленочных аппаратах // Изв. вузов СССР. Пищ. технология. – №5. – 1965. – С. 161—164.
2. *Воронцова ЕТ., Тананайко Ю.М.* Теплообмен в жидкостных пленках.– К.: Техніка, 1972. – 196 с.
3. *Исследование режимов парообразования в стекающей пленке жидкости методом акустической диагностики / Н.Ю. Тобилеаич, В. А. Ардашев, Н.А. Прядко, Н.Н. Король //Изв. вузов СССР. Энергетика.– 1984.– №12.– С. 63—67.*
4. *Struve H.* Blasenverdampfung bei einem Rieselfilms // Chem. Ing. Tech.– 1969.– V. 41, №7.–S.417-418

Надійшла до редколегії 10.02.03. р.