

О.В. ГЛОБА

М.О. ПРЯДКО, доктор технічних наук

В.З. ГЛОБА, А.В. ФОРСЮК, кандидати технічних наук

Національний університет харчових технологій

ТЕПЛОПЕРЕНЕСЕННЯ В ПЛІВКАХ ЯБЛУЧНОГО СОКУ

Наведено результати досліджень взаємозв'язку плівкових течій і тепловіддачі під час випаровування та кипіння низхідних плівок яблучного соку у вертикальній трубі в діапазоні режимних параметрів і концентрацій соку, для яких наявні результати дослідження досить обмежені й суперечливі. Одержані дані потрібні для уточнення науково-обґрунтованих підходів до створення випарних установок фруктових соків.

Ключові слова: теплоперенесення, тепловіддача, кипіння, плівка, фруктові соки.

Приведены результаты исследований взаимосвязи пленочных течений и теплоотдачи при испарении и кипении нисходящих пленок яблочного сока в вертикальной трубе в диапазоне режимных параметров и концентраций, для которых имеются результаты исследования весьма ограничены и противоречивы. Полученные данные необходимы для уточнения научно-обоснованных подходов к созданию выпарных установок фруктовых соков.

Ключевые слова: теплоперенос, теплоотдача, кипение, пленка, фруктовые соки.

Досліджено теплогідродинамічні (ТГД) процеси під час випаровування і кипіння яблучного соку, що стікає плівкою по внутрішній поверхні вертикальної труби при супутному потоці пари. Досліджено зону високих концентрацій соку і тиску вторинної пари, нижчого за 0,3 бар. Результати досліджень подано емпіричними і критеріальними залежностями для визначення інтенсивності тепловіддачі і втрат тиску [1, 2]. Робота планувалася як прикладна, і вона доведена до логічного завершення. Але особливості ТГД процесів і механізмів теплоперенесення в плівках яблучного соку ще потрібно

пояснити. На нашу думку, вони можливі лише за умови високої в'язкості рідини і великих об'ємів вторинної пари, тобто глибокого вакууму.

У значному діапазоні режимних параметрів, яким ніби має відповідати ламінарний режим руху рідини, теплообмін у плівках яблучного соку значно інтенсивніший, ніж за результатами розрахунку для ламінарних чи ламінарно-хвильових плівок. Це вимагає глибшого проникнення в особливості процесів і механізмів переносу в плівках.

Відомо, що суттєвий вплив на інтенсивність теплообміну має режим руху потоку. Ламінарний режим характеризується тим, що немає відхилень

миттєвих швидкостей руху елементів потоку. В ідеальних плівках всі вони рухаються паралельними траєкторіями без перемішування і теплоперенесення визначається молекулярною теплопровідністю.

Фактично ламінарним течіям на вертикальній поверхні завжди притаманна нестабільність [3]. Ламінарні безхвильові плівки з гладенькою поверхнею важко реалізувати навіть у лабораторних умовах. У трубах промислових випарних апаратів (ВА) на поверхні плівки утворюються гравітаційні, капілярні та концентраційні хвилі вже при незначній щільності зрошення. Проходження хвиль супроводжується пульсаційними збуреннями. Тому в ламінарно-хвильових плівках до теплопровідності долучається конвективне теплоперенесення внаслідок перемішування рідини поверхневими хвилями.

Режими течії і рельєф поверхні плівок, що гравітаційно стікають по вертикальній поверхні, залежать від витрат і теплофізичних властивостей рідини. Поступове збільшення щільності зрошення викликає еволюцію плівки від ламінарної до турбулентної. За гідродинамічними параметрами плівки густого яблучного соку до турбулентних не належать. Водночас дослідні коефіцієнти тепловіддачі в плівках яблучного соку перевершують розраховані для ламінарно-хвильових плівок з домінуючим конвективним теплоперенесенням. Це свідчить про наявність особливих ламінарно-хвильових течій яблучного соку, яким притаманні механізми теплоперенесення високої інтенсивності.

Описуючи ламінарно-хвильовий режим течії плівок, П.Л. Капиця відмічав [4,5], що максимальна швидкість рідини виникає в найширшій частині потоку, тобто в гребенях хвиль. У западинах хвиль швидкість сповільнюється до нуля і може бути від'ємною. Зі збільшенням витрати рідини плівка еволюціонує до фізичної моделі, яку правильніше уявляти як скочування по твердій плоскій поверхні видовжених крапель рідини з крутим фронтом і видовженим хвостом. За аналогією течію густого яблучного соку в круглій нагрівній трубі можна уявити як скочування по поверхні труби кілець рідини. До такого уявлення про форму течії ми схилилися, спостерігаючи потік на виході з дослідної труби в сепаратор. Чергування більшого і меншого вмісту рідини в потоці на виході із дослідної труби, які візуально фіксувалися в ілюмінаторах сепаратора дослідної установки при високій концентрації соку, справляло враження, що в трубі пропливають і на виході з неї подрібнюються кільця рідини. Товсті плівки яблучного соку з напливами ми спостерігали в скляних трубопроводах. Хвилі скочування виникають, наприклад, у похилих відкритих каналах при невисоких значеннях чисел Рейнольдса. Для них характерне спокійне ламінарне стікання з сильним завихренням на гребенях хвиль [6].

Двовимірне стікання плівки можливе [4, 5] при невеликих значеннях чисел Рейнольдса

$$Re = (2,43 \dots 12,15) Ka^{1/11}$$

де $Re = 4\Gamma_v / \nu$ – число Рейнольдса; $Ka = \sigma^3 / (\rho^3 g) \nu^4$ – число Капиці; Γ_v – щільність зрошення, m^2/c ; ν –

коефіцієнт кінематичної в'язкості соку, m^2/c ; σ – коефіцієнт поверхневого натягу, kg/c^2 ; ρ – густина соку, kg/m^3 ; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 .

З досліджених нами плівок яблучного соку за умовою Капиці в зону двовимірної течії потрапляють ті, що характеризуються числом $Ka < 30$, що охоплює масив даних для соку концентрацією понад 40 % і тиском, меншим за 0,3 бар. За інтенсивністю теплообміну вони не узгоджуються з відомими залежностями [3,7]. Дослідні коефіцієнти тепловіддачі перевищують розрахункові дані для двовимірних перехідних плівок. Це свідчить про ефективніший, ніж у ламінарно-хвильових плівках, механізм перенесення. Можна припустити, що досліджені плівки густого яблучного соку, який відрізняється високою в'язкістю і числом Прандтля $Pr > 80$, були тривимірними.

Розподіл локальних параметрів вказує на те, що режим течії плівки по довжині труби залишався без суттєвих змін починаючи з першої ділянки. Отже, тривимірні хвилі генерувалися на переливному порозі і спливали в трубу. Відповідно до гідродинамічної обстановки у розподільній камері і неширокого інтервалу витрат рідини через переливний поріг могли генеруватися хвилі неширокого спектра частот і близькі за структурою. Хвильовий режим плівки міг встановлюватися на вхідній (адіабатній) ділянці труби під дією гідродинамічних факторів. На відміну від капілярних синусоїдальних хвиль великі хвилі тривимірних течій мають відрізнятися низькими частотами, великими амплітудою і довжиною. Рухаючись з невеликою швидкістю вздовж труби, такі хвилі викликають коливання температури в стінці труби і в рідині різних частин хвильового профілю. При високих концентраціях соку в плівці виникають великі градієнти в'язкості. Завдяки цьому до гідродинамічних факторів хвилеутворення долучаються теплові.

Усі теплові процеси включають ланку запізнення і зумовлюють відставання за фазою. Тому чисто гідродинамічні хаотичні хвилі на нагрівній поверхні труби мали перебудовуватися та стати регулярнішими і низькочастотними. Прокочуючись вздовж труби, вони сприяють перенесенню маси й енергії в плівці, посилюють інтенсивність тепловіддачі. За механізмом вплив низькочастотних хвиль на тепловіддачу частково аналогічний впливу лопаті в ротаційних випарних апаратах і реакторах. Вони знімають і виносять на поверхню нагріту рідину, залишають на трубі тонку плівку холодної рідини. Це вірогідна версія інтенсифікації теплоперенесення в ламінарно-хвильових плівках яблучного соку. Вона потребує експериментального підтвердження.

Щоб розширити уявлення про особливості руху плівок яблучного соку, ми провели дослідження їхньої течії на вертикальних листах із нержавіючої сталі та скла. Дослідження проводили при атмосферному тиску і температурі в приміщенні. Для досліджень готували модельні розчини яблучного соку і мінеральних солей. За основний фактор брали в'язкість розчину. Контрольними параметрами були

температура і вміст сухих речовин. Щільність зрошення змінювали в інтервалі $(15...35) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

На шляху пробігу структурні характеристики плівок змінюються, втрачається регулярність і симетричність форми хвиль. За межами ділянки основної гідродинамічної стабілізації при невеликих щільностях зрошення плівки води і яблучного соку низької концентрації за своїми властивостями задовільно узгоджуються з ламінарно-хвильовими плівками [3,5].

По поверхні плівок концентрованого яблучного соку скочуються великі хвилі у вигляді відносно товстих і швидкоплинних пластів рідини (*рисунок*). В них переноситься більша частина витрат рідини в плівці. Між великими хвилями поверхня рідини рівна або покрита капілярними хвилями. Товщина на небагато, а швидкість значно менша середньої. Великі хвилі спливають нерегулярно, іноді — циклічно. Плівкам густого яблучного соку, що гравітаційно стікають по вертикальній поверхні, властиві велика товщина (0,6.. 0,8 мм і більше) і мала швидкість руху. Значення середніх товщини і швидкості руху задовільно узгоджуються з розрахунками роботи [2].

Дослідні дані підтвердили, що плівки густого яблучного соку дійсно відрізняються деякими особливостями течії, які позитивно впливають на масообмін. Але за нашими оцінками вони не є достатніми для пояснення високої інтенсивності тепловіддачі в зоні випаровування.

У плівках густого яблучного соку, що гравітаційно стікають під вакуумом по вертикальній поверхні в зоні низьких чисел Рейнольдса, молекулярна теплопровідність і конвективне теплоперенесення характеризуються низькою інтенсивністю. Тому значним може виявлятися внесок теплоперенесення паровою фазою ще далеко від межі розвинутого кипіння плівки, тобто в зоні випаровування. Немає єдиної думки про механізм пароутворення в плівках рідини. Є окремі дослідження, що висвітлюють окремі факти процесів і механізму пароутворення [3].

У рухомій плівці води парові бульбашки утворюються в пристінних центрах пароутворення і дрібними зносяться вниз у вигляді ланцюжків пари. Окремі бульбашки випливають на поверхню і лопаються. За даними робіт [3, 8, 9 та ін.], парові бульбашки в рухомій плівці води утворюються при досить малій різниці температур стійки і насичення пари. Часто це 1...2 К.

Процес пароутворення дуже динамічний [7]. В рухомій плівці води при атмосферному тиску і теплових потоках більших ніж $8 \text{ кВт}/\text{м}^2$ новий зародок парової фази з'являється через 8 мс після відривання попередньої бульбашки і зростає вибухоподібно. За час одного циклу пароутворення плівка проходить шлях 10...15 мм. Тепловий потік через поверхню бульбашки сягає $150 \text{ кВт}/\text{м}^2$. В міру зростання бульбашки її вершина поступово виступає над поверхнею рідини. Сили поверхневого натягу починають діяти по обидва боки плівки і тиск в бульбашці зростає від $2\sigma/R$ до $4\sigma/R$.

При невеликих теплових потоках спостерігається спокійне випаровування без парових бульбашок на нагрівній поверхні й інтенсивність теплообміну не залежить від теплового потоку. При цьому температурний напор не перевершує 2 К. В міру збільшення температурного напору починають утворюватися і спливати ланцюжками парові бульбашки. Кількість бульбашок зростає, і посилюється турбулізація пристінного межового шару, поліпшується відведення теплоти від нагрівної стінки.

Методом акустичної діагностики встановлено [10, 11], що на ділянці, де інтенсивність тепловіддачі не залежить від теплового потоку, парові бульбашки не утворюються. Пароутворення відбувається випаровуванням з поверхні плівки. При більш високих теплових потоках утворюються парові бульбашки і підвищується інтенсивність тепловіддачі зі збільшенням теплового потоку. Тепловий потік, що відповідає початку розвинутого бульбашкового кипіння, підвищується в разі зростання щільності зрошення і швидкості плівки та зменшується з підвищенням в'язкості рідини.

На підставі візуального дослідження процесів випаровування плівок питної і морської води та аналізу науково-технічної інформації [12] виділяється зона, де відбуваються зародження і відрив парових бульбашок, вплив яких суттєво не позначається на процесі перенесення в плівці. Бульбашки рухаються разом з плівкою і не досягають її поверхні. При питомій густині теплового потоку $40...60 \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К})$ і густині зрошення $1,5...3,0 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ кількість парових бульбашок, які спостерігаються візуально, незначна. Вони не мають суттєвого впливу на течію плівки, не порушують її структуру. Зазначеним умовам відповідають температурні напори не менші ніж $4...6 \text{ К}$ і числа Рейнольдса більші ніж 6000. Внесок бульбашкового кипіння в зростання коефіцієнта тепловіддачі автори вважають несуттєвим. Його можна оцінити в межах $0,5...1,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К})$.

Згадані особливості пароутворення стосуються турбулентних плівок, високих значень Γ_v і чисел Рейнольдса. Область ламінарних і псевдоламінарних плівок досліджувалася мало, а ламінарних плівок високов'язких рідин не досліджувалася взагалі. Про механізм теплоперенесення в них даних немає.

При поверхневому кипінні температура в пристінному шарі рідини змінюється від температури стінки до температури насичення, а за його межами вона нижча від температури насичення. Тому одночасно можуть відбуватися пароутворення і конденсація пари в об'ємі однієї бульбашки, яка своєю основою розташована в перегрітому пристінному шарі, а вершиною в переохолодженій рідині [13]. Залежно від співвідношення швидкостей пароутворення і конденсації розмір парової бульбашки може збільшуватися чи зменшуватися. В міру зменшення недогріву конденсація пари призупиняється і дрібні бульбашки проникають в холодне ядро потоку. Паровміст зростає. При поверхневому кипінні води

парова фаза може досить довго перебувати в переохолодженому ядрі, не конденсуючись повністю. Зменшення недогріву призводить до збільшення паровмісту й інтенсивності тепловіддачі в 1,5 – 2 рази.

При поверхневому кипінні парові бульбашки після відриву охолоджуються в ядрі потоку і швидко зменшуються внаслідок конденсації пари. Швидкі фазові переходи супроводжуються значними відхиленнями системи від умов рівноваги фаз [14]. При цьому одна з фаз виявляється в метастабільному стані. Чим інтенсивніші процеси, тим більше відхилення в бік метастабільності. Можливо тому частина бульбашок зменшується в розмірах, але відносно довго не зникає в холодному ядрі.

За моделлю Д.А. Лабунцова основне випаровування, що визначає ріст бульбашки на нагрівній поверхні, відбувається поблизу її основи. Теплота до поверхні поділу фаз відбирається безпосередньо від нагрівної поверхні й передається транзитом у зону випаровування теплопровідністю через прилеглі шари рідини. Бульбашка в процесі росту розштовхує гарячу рідину і виступає вершиною в шар холодної рідини або піднімає над собою шапку гарячої рідини.

Випаровування з поверхні плівок яблучного соку підвищених концентрацій відбувалося при температурих напорах, що у два і більше разів перевищували температурні напори початку кипіння в плівках води.



Плівкова течія яблучного соку на вертикальній пластині.
 $CR = 47 \%$, $t = 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $\Gamma_v = 26,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, $\delta = 0,87 \text{ мм}$

Від води сік відрізнявся нижчою теплопровідністю і високою в'язкістю. Поверхневі натяги соку і води приблизно однакові. Під великим температурним напором теплота в рідину пристінного шару соку підводилася швидко, а переносилася до вільної поверхні повільніше, ніж у плівках води, тобто накопичувалася. Генерація пари в центрах пароутворення проходила інтенсивно. Парові бульбашки в перегрітому шарі яблучного соку утворювалися і виростали так же швидко, як і в плівках води. Високий рівень в'язкості фаз обмежував спливання. Нижкою парова бульбашка ще утримувалася за нагрівну поверхню, а вершиною вже виринала над вільною поверхнею плівки. Оболонка (шар рідини) над вершиною швидко тоншала [15]. Тому втрачався опір теплоперенесенню на її зовнішню поверхню. Посилювалися випаровування в парове ядро потоку і конденсація пари на внутрішній поверхні оболонки. Внаслідок стікання рідини оболонка проривалася [15]. Спочатку в ній утворювався капілярний отвір і з бульбашки в парове

ядро стікала пара, а приєднана маса рідини відкидалася до поверхні труби в перегріту рідину. Утворювалася пара. Парові бульбашки в плівках густого соку вироджувалися в парові пори. Парова бульбашка (пора) в середовищі густого соку значно довговічніша, ніж у швидкоплинних і набагато тонших плівках води. Термін життя парової пори порівняно з періодом циклу пароутворення в плівках води має бути на порядок довшим. Утримуючись на центрі пароутворення чи рухаючись вздовж поверхні, пора інтенсивно збирала пару з перегрітої рідини плівки. Великі питомі об'єми пари подовжували час її витікання і життєдієвість пори. З поверхні пори відбувалося випаровування в паровий об'єм. Тому інтенсивність тепловіддачі не залежала від теплового потоку. Ендотермічний перехід рідини в пару міг також відбуватися безпосередньо на поверхні (чи при поверхні) труби, а евакуація пари – по порожнині пори. Самовільно таким механізмом теплоперенесення міг встановлюватися в плівках лише густого яблучного соку при великих питомих об'ємах пари.

Висновки. Проведено дослідження режимів руху плівок і впливу їх на інтенсивність тепловіддачі при випаровуванні яблучного соку, що стікає по внутрішній поверхні вертикальної турби. Запропоновано фізичне обґрунтування високоефективного механізму теплоперенесення в зоні випаровування густого соку, в основу якого покладено гідродинамічні особливості руху плівок, пов'язані з вірогідною наявністю фазового переходу в пристінній зоні плівки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глоба О.В., Прядко М.О., Форсюк А.Л. Тепловіддача при випаровуванні плівок яблучного соку // Наук. пр. НУХТ. – 2003. – №14. – С. 29–31.
2. Глоба О.В., Прядко М.О., Форсюк А.В. Втрати тиску в процесі випаровування плівок яблучного соку // Наук. пр. НУХТ. – 2004. – №15. – С. 75–77.
3. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных пленках. — К.: Техніка, 1972. — 196 с.
4. Капица П.Л. // ЖЭТФ. — 1948. — Т.18, №3. — С. 1-28; 1951. — Т.21, №9. — С. 964-978.
5. Капица П.Л., Капица С.П. // ЖЭТФ. 1949. — Т.19, №2. — С.105—120.
6. Иванов Ю.П. Катящиеся волны в наклонном канале // Журнал ВМ и МФ. — 1961. — Т.1, №6. — С.1075.
7. Struve H. Blasenverdemfung bei einem Rieselfilms // Chem. Ing. Techn. — 1969. — V. 41, №7. — S.417-418.
8. Тананайко Ю.М. Химическое машиностроение. — К.: Техника, 1965. — С.59-66.
9. Тананайко Ю.М., Воронцов Е.Г. Методы расчета и исследования пленочных процессов. — К.: Техніка, 1975. — 312 с.
10. Ардашев В.Л. Исследование теплообмена при выпаривании гравитационно стекающей пленки жидкооти в вертикальных трубах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/ КТИП. — К., 1983. — 26 с.
11. Исследование режимов парообразования в стекающей пленке жидкости методом акустической диагностики / Н.Ю. Тобилевич, В.А. Ардашев, Н.А. Прядко, Н.И. Король / Изв. вузов СССР. Энергетика. — 1984. — №12. — С. 63-67.
12. Таубман Е.Л. Выпаривание. — М.: Химия, 1982. — 328 с.
13. Кутнепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании — М.: Высш. шк., 1986. — 448 с.
14. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии / В.П. Скрипов, Е.Н. Синицын, В.П. Павлов и др. — М.: Атомиздат. — 1980. — 208 с.
15. Тихомиров В.Х. Пенны. Теория и практика их получения и разрушения. — М.:Химия, 1983. — 264 с.

