УДК 536.242

THERMAL RESISTANCE IN BOUNDARY LAYER OF DOWNSTREAM FILMS IN HIGH-VISCOSITY FLUIDS

M. Pryadko, O. Globa, A. Forsiuk, V. Globa
National University of Food Technologies

Key words:
Thermal resistance
Heat-transfer
Evaporation
Surface boiling
Apple juice

Article history:
Received 20.09.2014
Received in revised form 20.10.2014
Accepted 01.11.2014

Corresponding author:
O. Globa
E-mail:
npnuht@ukr.net

ABSTRACT

A hypothesis of highly effective heat-transfer in the down falling apple juice films and its substantiations have been studied thoroughly. The experimental conditions and methods of experimentation as well as data processing methodology are presented and discussed. The obtained experimental results were compared with the data available in literature; the sources of discrepancies were analyzed. The results of thermo-hydrodynamic processes, in particulars within the boundary level, during the heating of the viscous falling down the inner vertical tubular surface films allowed to highlight the specifics of heat transfer. The influence of surface geometry, regime parameters and physical properties of working liquid were determined. The particulars of the physical model and transport mechanisms within the boundary layers of liquid, which determine its thermal resistance, are presented. The obtained results may add to the theoretical bases for modern designing practice of thermal technological plants.

ТЕРМІЧНИЙ ОПІР У ПРИСТІННОМУ ШАРІ НИЗХІДНИХ ПЛІВОК ВИСОКОВ'ЯЗКИХ РІДИН

М.О. Прядко, О.В. Глоба, А.В. Форсюк, В.З. Глоба
Національний університет харчових технологій

У статті обґрунтовано гіпотезу високоефективного теплоперенесення в плівках густого яблучного соку. Визначено умови і методику проведення дослідження. Здійснено порівняння отриманих експериментальних даних з даними інших авторів і проаналізовано причини розбіжності. Результати дослідження теплогідродинамічних процесів, зокрема в пристінному шарі, при нагріванні високов'язкої рідини та при її концентруванні, коли рідина стікає у вигляді плівки по внутрішній поверхні вертикальних труб, дали змогу виявити особливості механізмів теплоперенесення. Визначено вплив на термічний опір тепловіддачі геометричних та режимних параметрів і теплофізичних властивостей робочої рідини. Проаналізовано особливості фізичної моделі і механізмів теплоперенесення в пристінному шарі рідини, які визначають його термічний опір. Отримані результати доповнюють науково-технічну базу створення теплотехнологічних установок.

Ключові слова: *термічний опір, теплоперенесення, випаровування, поверхневе кипіння, яблучний сік.*

Відправним пунктом даного дослідження стала суттєва невідповідність експериментально визначеної інтенсивності тепловіддачі гідродинамічним умовам, що відповідають режимам випаровування з вільної поверхні плівок яблучного соку [4], характерним для роботи промислових випарних апаратів при виробництві яблучного концентрату. Проведені нами дослідження теплообміну і гідродинаміки при концентруванні яблучних соків описані в [4]. За результатами дослідження розроблена і введена в промислову експлуатацію на Чернівецькому олієжировому комбінаті (ОЖК) перша вітчизняна випарна установка яблучного соку. Також висунута гіпотеза, що пояснювала високоефективне теплоперенесення в плівках густого яблучного соку. Нижче наведене більш повне її обґрунтування.

У широкому діапазоні теплових потоків інтенсивність тепловіддачі в низхідних плівках яблучного соку не залежить від величини теплового потоку. Вважається, що це зона випаровування з вільної поверхні плівок і теплота від внутрішньої стінки труби до місця випаровування на поверхні плівки переноситься в режимі однофазної конвекції. Закономірності конвективного теплоперенесення в низхідних плівках двофазних потоків приймаються дослідниками аналогічними конвективному теплоперенесенню при русі рідини без зміни агрегатного стану в трубах підігрівників.

З'ясувалося, що інтенсивність тепловіддачі при випаровуванні виявилась вищою, ніж при нагріванні соку. Це при тому, що в обох режимах основним було, як вважалося, конвективне теплоперенесення в плівках.

Мета і завдання. Дослідити теплогідродинамічні процеси, зокрема в пристінному шарі, при нагріванні високов'язкої рідини та при її концентруванні, коли рідина стікає у вигляді плівки по внутрішній поверхні вертикальних труб, виявити особливості механізмів теплоперенесення і впливу на термічнй опір тепловіддачі геометричних та режимних параметрів і теплофізичних властивостей робочої рідини.

Матеріали і методи. Як робочу рідину для експериментальних досліджень використовували яблучний сік, особливістю якого є широкий діапазон зміни теплофізичних властивостей у процесі концентрування. Так, в'язкість зростає більше, ніж на два порядки, суттєво зменшується теплопровідність.

Дослідження проводили на однотрубній моделі плівкового випарного апарата [4]. Дослідна труба із внутрішнім діаметром 32 мм була поділена на шість ділянок (довжина кожної 600 мм) і обігрівалась сухою насиченою парою. Кожна ділянка обладнана чашечками для збирання конденсату, імпульсними трубками для приєднання п'єзометрів і мідь-константановими термопарами. Температуру робочої рідини визначали за розподілом тиску у трубі та за тепловим балансом.

Зона досліджень характеризується такими параметрами: тиск пари в сепараторі P_0 = 0,1…0,6 бар, вміст сухих речовин у соку СР = 20…70 %, об'ємна густина зрошення Γ_v = (16…40)·10^{-5} м^2/с, тепловий потік q = 2…20 кВт/м^2. Дослідження процесів випаровування і нагрівання проводили групами

дослідів із соком одного зразка в ідентичних умовах, що дозволяє корректно порівнювати їх результати. Температуру соку на вході в трубу підтримували відповідно до температури насичення в розподільчій камері з урахуванням температурної депресії, а процеси нагрівання соку досліджували в заповненій трубі.

Результати і обговорення.

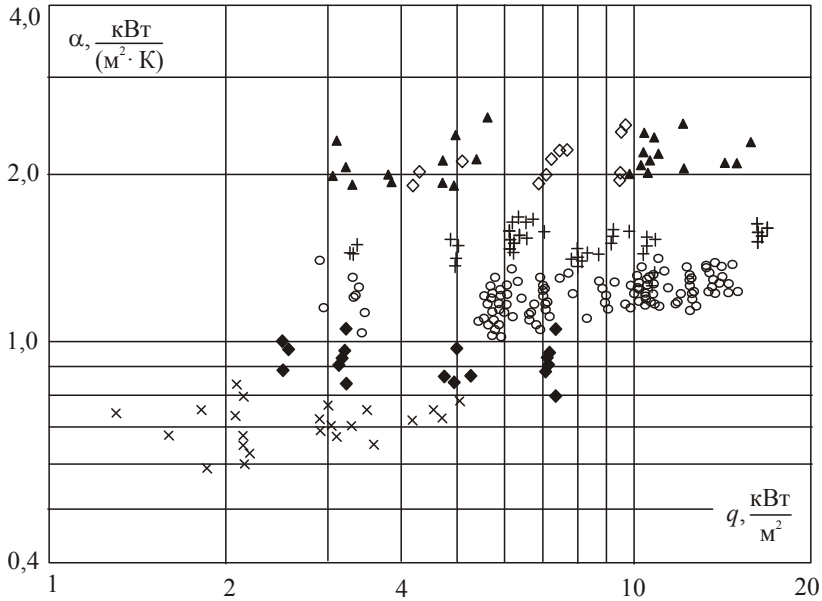


Рис. 1. Залежність α = *f*(*q*). Випаровування: ○ — P_0 = 0,12 бар, СР = 70%; + — P_0 = 0,3 бар, СР = 65%; ▲ — P_0 = 0,3 бар, СР = 45%
Нагрівання: ╳ — СР = 70%; ◆ — СР = 65%; ◇ — СР = 45%

Залежність локальних коефіцієнтів тепловіддачі від нагрівної поверхні до плівок рідини $\alpha=f(q)$ показано на рис.1. Якісно вона узгоджується з даними авторів, що працювали з яблучним соком і цукровими розчинами [2, 3]. Варто зауважити, що при невеликих температурних напорах $\Delta t \leq 5\ldots6$ К і, відповідно, теплових потоках q коефіцієнт тепловіддачі α_2 майже не залежить від q. Це зона випаровування з вільної поверхні плівки. Дані на графіку розшаровуються за $СР_0$ і $P_0(t_0)$, тобто за теплофізичними властивостями соку. З підвищенням вмісту сухих речовин до СР = 70 % коефіцієнти тепловіддачі в зоні випаровування зменшуються майже до 1 кВт/(м^2·К) і значно нижчі при нагріванні соку. В зоні випаровування, відповідно до q, швидкість пари обмежена. Також зафіксовано незначний вплив [4] парового потоку на процеси масо- і теплоперенесення в плівці, де домінують впливи теплофізичних властивостей рідини.

При підвищенні концентрації соку до СР = 45 % його в'язкість повільно зростала до $2{,}5\cdot10^{-6}$ м^2/с. Такий сік слід вважати рідким, а високов'язкий сік СР > 45 % — густим. За дослідними даними інтенсивність тепловіддачі в режимах випаровування і підігрівання рідкого соку практично однакова (рис. 2), але суттєво відрізняється в зоні густого соку. Це добре видно на прикладі

порівняння коефіцієнтів тепловіддачі при випаровуванні яблучного соку під тиском P_0 = 0,3 бар, і підігрівання його в тих же температурних умовах. З підвищенням концентраї соку вище 45 % коефіцієнти тепловіддачі при нагріванні соку різко відхиляються вниз від тих, які відносяться до випаровування.

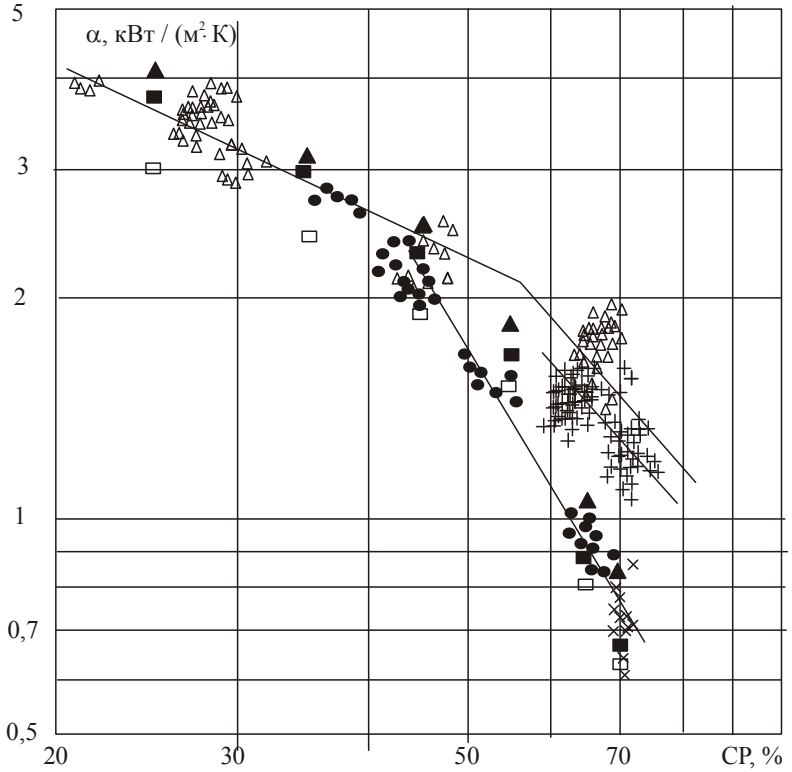


Рис. 2. Залежність α = f(СР). P_0 = 0,12 бар: + — випаровування, × — нагрівання. P_0 = 0,3 бар: △ — випаровування, • — нагрівання. Результати розрахунку за: □ — (1), ■ — (2), ▲ — (3)

При невеликих температурних напорах, поки інтенсивність тепловіддачі не залежить від теплового потоку і відбувається випаровування з вільної поверхні низхідних плівок яблучного соку, теплота від нагрівача на поверхню плівки переноситься до місця випаровування в режимі однофазної конвекції [4]. Методом акустичної діагностики встановлено, що утворення парових бульбашок на нагрівній поверхні в аналогічних умовах відсутнє [2]. На цій підставі можна вважати, що в зоні випаровування діють механізми однофазної конвекції. В режимі підігрівання рідини, яка рухається вздовж нагрівної поверхні без зміни агрегатного стану в низхідних плівках чи в заповнених трубах, теплоперенесення від нагрівної поверхні до потоку також здійснюється за рахунок конвекції. Це означає, що за однакових теплогідродинамічних умов і механізмів теплоперенесення коефіцієнти тепловіддачі різні.

Експериментально досліджено, що режими плівкових течій і потоків яблучного соку в заповненій трубі були ламінарно-хвильовими тривимірними, перехідними чи турбулентними. Для розрахунку тепловіддачі скористалися рекомендованими для зазначених умов співвідношеннями, наведеними у В.Д. Попова [8], та формулою для розвиненого турбулентного режиму [1]:

$$\alpha\left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} = 3,8\cdot 10^{-3}\lambda\cdot \mathrm{Re}_p^{\,0,4}\cdot \mathrm{Pr}^{0,65}\,; \qquad (1)$$

$$\mathrm{Nu} = 0,008\,\mathrm{Re}^{0,9}\cdot \mathrm{Pr}^{0,433}\,; \qquad (2)$$

$$\mathrm{Nu} = 0,023\,\mathrm{Re}^{0,8}\cdot \mathrm{Pr}^{0,4}\,. \qquad (3)$$

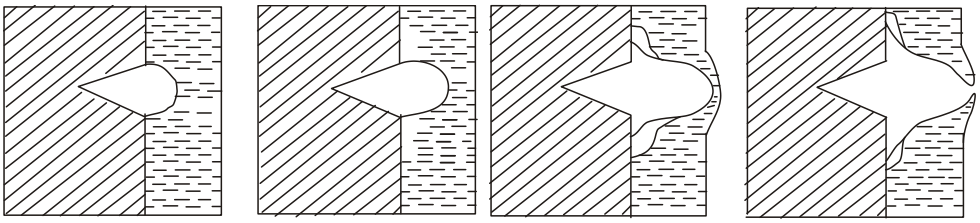
Розрахункові коефіцієнти тепловіддачі в цілому задовільно відповідають експериментальним даним (рис. 2), які відносяться до підігрівання соку, і значно нижчі за ті значення, що відносяться до випаровування з вільної поверхні плівок густого соку. Той факт, що результати розрахунку за всіма співвідношеннями задовільно корелюють з дослідними даними і між собою, свідчить про аналогію теплогідродинамічних процесів у досліджуваних плівкових і в суцільних потоках та про дотримання в наших дослідженнях умов порівняння.

Розрахункові співвідношення (2) і (3) побудовані на моделях конвективного теплообміну і рекомендуються, в тому числі, для розрахунку підігрівачів паливно-мастильних та інших високов'язких продуктів. Вони відображають лише конвективну складову теплового потоку. Стаціонарне конвективне теплоперенесення від нагрівної поверхні до вільної поверхні плівок забезпечує випаровування рідкого соку і складає лише частину теплового потоку у випадку густого соку. Очевидно, що в низхідних плівках густого соку в умовах великого термічного опору конвективному теплоперенесенню діють ще й інші, більш ефективні, механізми теплопернесення, що можуть бути властиві поверхневому кипінню.

Перехідна зона від випаровування з вільної поверхні плівки до розвиненого кипіння є зоною поверхневого кипіння [3], або зоною, де починається утворення і відрив парових бульбашок, вплив яких на теплоперенесення невеликий [7]. Ця зона найменш досліджена і навіть в її назві залишаються неточності і суперечності. Наприклад, поверхневе кипіння аналогічне недогрітому, але не зрозуміло, що відбувається з поверхневими бульбашками, якщо в плівці немає недогрітої рідини, в якій би вони деградували завдяки конденсації пари. Для поверхневого кипіння густого яблучного соку необхідно розглянути фізичну модель і механізми високоефективного теплоперенесення та пояснити, чому зона пароутворення не виявляла себе акустично, тоді як залежність $\alpha=f(q)$ залишалася характерною для зони випаровування. Очевидно, що висока інтенсивність тепловіддачі зумовлена особливостями структури і режимів руху плівок густого соку.

У низхідній плівці рідини, біля нагрівної поверхні, утворюються так звані межові гідродинамічний і тепловий шари [5] з великими градієнтами, відповідно, швидкості і температури по нормалі до нагрівної поверхні, які різко зменшуються до нуля в основних потоках з усередненими швидкістю і температурою.

У безградієнтному за тиском ламінарному потоці біля рівномірно нагрітої плоскої пластини товщина теплового шару δ_t і гідродинамічного шару $\delta_г$ знаходяться [6] в приблизному співвідношенні $\delta_t = \delta_г \cdot \mathrm{Pr}^{-0,43}$. У таких високов'язких рідинах з низькою теплопровідністю, як густий яблучний сік, δ_t в кілька разів (до 10 і більше) менша $\delta_г$. Це означає, що в досліджуваних нами ламінарно-хвильових тривимірних плівках, які є найпоширенішими в теплотехнологічних апаратах, тепловий шар займає малу пристінну частину ламінарного підшарку, в якому інтенсивність тепловіддачі відповідає рівню молекулярної теплопровідності та зосереджений практично весь термічний опір конвективному перенесенню теплоти. Суттєво перегріта рідина теплового шару знаходиться в метастабільному стані. Теплоперенесення відбувається в режимі метастабільної конвекції. Безпосередньо на нагрівній поверхні складаються умови для поверхневого кипіння і включення властивих цьому процесу високоефективних механізмів теплоперенесення через тепловий шар, тобто через зону високого термічного опору.



а б в г

Рис. 3. Розвиток мікробульбашки

Найбільш перегрітим є прилеглий до нагрівної поверхні мікрошар рідини теплового шару. Мікрошар перегрітий по всій площі нагрівної поверхні, але труднощі включення початкової стадії утворення парової фази, пов'язані зі стрибками зміни ентропії й об'єму системи, зумовлюють локальне пароутворення і перервність його процесу. Парова фаза зароджується в заглибинах нагрівної поверхні, в яких досягаються найвищі локальні температура рідини й відхилення від стану стабільної рівноваги фаз. Це так звані діючі гетерогенні центри пароутворення, де досягається порушення суцільності рідини й утворення життєздатного зародка парової фази. Від зародка до поверхні заглибини і навколо неї концентричними колами прокочується хвиля постадійного утворення парової емульсії (рис.3 а, б), що трактується як розпад мікрошару рідини і метастабільної однофазної конвекції.

Емульсія нетривка. Услід за хвилею утворення прокочується хвиля її розпаду і збирання пари в бульбашку над заглибиною. В об'єм поверхневої бульбашки продукує пару також прилегла перегріта рідина теплового шару. Локальна температура рідини і нагрівної поверхні зменшуються, продукування пари призупиняється, парова бульбашка віддає тепло в парове ядро і деградує.

Проведені за співвідношеннями Купера і Ллойда [4] розрахунки показують, що в густому яблучному соку при тиску, меншому за атмосферний, час росту поверхневих парових бульбашок τ (рис. 4), товщина мікрошару

($\delta_0 = \sqrt{\nu \cdot \tau}$, де ν і τ — кінематична в'язкість рідини) і час росту основи парової бульбашки в десятки разів перевершують свої значення для води при атмосферному тиску. Велика маса перегрітої рідини товстих теплового і мікрошару продукує в циклі пароутворення при низькому тиску великий об'єм пари, тому парова емульсія «розповзається» широкими плямами (рис. 3 б), а парові бульбашки переростають товщину плівки і перетворюються в парові пори.

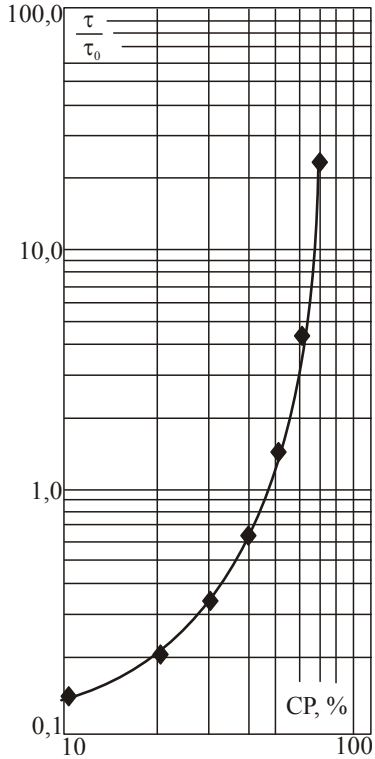


Рис. 4. Тривалість росту поверхневої бульбашки

Об'ємний стрибок системи при утворенні зародків парової фази й рості парової бульбашки викликає поршневий ефект і створює мікроциркуляційний контур виштовхування частини перегрітої рідини із мікро- і теплового шарів.

Тиск і температура пари в паровій бульбашці вищі, ніж у ядрі потоку, тому відбувається конденсація пари на внутрішній поверхні і випаровування із зовнішньої поверхні оболонки її куполу (рис. 3 в). Оболонка над паровою сферою швидко потоншується під дією гравітаційних і капілярних сил, через неї спрямовуються потужні теплові потоки навіть при невеликих перепадах температури, включається інтенсивне локальне випаровувально-конденсаційне теплоперенесення через тепловий шар за схемою теплового насоса.

Під дією градієнта концентрацій, поперечного потоку маси і додаткового силового навантаження, яке створює потік пари від нагрівної поверхні, в оболонці утворюється отвір — поверхнева бульбашка перетворюється в пору (рис. 3 г). З купола парових бульбашок і з міжфазної поверхні пор відбувається звичайне випаровування в ядро двофазного потоку, тому інтенсивність тепловіддачі α не залежить від q.

Розподіл по товщині структурних складових плівки густого соку (див. вище) показує, що тепловий шар, а тим більше мікрошар, малодосяжний для впливу на нього, зокрема впливу на його термічний опір особливостей структури і режимів руху плівкових течій.

Інтенсивний теплообмін у плівках густого соку та інших високов'язких розчинів здатні забезпечити мікроциркуляційні і випаровувально-конденсаційні механізми, які викликаються поверхневим кипінням, тому маємо визнати участь поверхневого кипіння.

Діючими центрами пароутворення на нагрівній поверхні при підвищенні температурного напору першочергово стають вузькі заглибини з найбільшим

відношенням площі внутрішньої поверхні до об'єму, але ще здатні заповнюватись рідиною. За законом нормального розподілу їх мало, вони поодинокі і не впливають на сусідні. Ширші заглибини більш масові, вищі температурні напори та наступні черги включення. Діючі центри першої черги при підвищенні Δt і ν можуть пересихати, не встигаючи заповнюватись рідиною. Цим можна пояснити результати досліджень, в яких фіксується тимчасове зменшення інтенсивності тепловіддачі при збільшенні q у режимах випаровування в'язких розчинів.

Парові бульбашки в зоні поверхневого кипіння густого соку поодинокі, для них характерні повільний ріст і деградація. Малоймовірно, що вони створюють звуковий спектр, властивий рідинам з меншою в'язкістю.

Багатостадійність пароутворення і деградації парових бульбашок, розтягнутість у часі та приглушення в середовищі емульсії послаблюють звукові ефекти. Важливим є те, що западини при деградації парових бульбашок заповнюються емульсією або вона залишається в них для початку парової фази і наступний акт пароутворення починається не з вибухового розриву цілісності рідини в заглибині. Поверхневе кипіння на розосереджених центрах пароутворення акустично не виявляється, аж поки не стає масовим, наближеним до розвиненого.

Висновки

Високу інтенсивність тепловіддачі при випаровуванні в низхідних плівках високов'язких розчинів забезпечує поверхневе кипіння. Особливості пароутворення в середовищі густого соку ускладнює виявлене поверхневе кипіння при невеликих температурних напорах.

Література

1. *Андреев В.А.* Теплообменные аппараты для вязких жидкостей / В.А. Андреев. — Л.: Энергия, 1971. — 151 с.

2. *Ардашев В.А.* Исследование теплообмена при выпаривании гравитационно стекающей плёнки жидкости в вертикальных трубах: Автореф. дис. … канд. техн. наук /КТІПП. — К., 1983. — 26 с.

3. *Воронцов Е.Г.* Теплообмен в жидкостных плёнках / Е.Г. Воронцов, Ю.М. Тананайко — К.: Техніка, 1972.— 196 с.

4. *Глоба О.В.* Теплогідродинамічні процеси у плівкових випарних апаратах для яблучного соку: Автореф. дис. … канд. техн. наук / НУХТ. — К., 2011. — 20 с.

5. *Исаченко В.П.* Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. — М. — Л.: Энергия, 1965— 424 с.

6. *Себиси Т.* Конвективный теплообмен / Т. Себиси, П. Бредшоу. — Москва: Мир, 1987. — 592 с.

7. *Таубман Е.И.* Выпаривание / Е.И. Таубман. — М.: Химия, 1982. — 328 с.

8. *Чжунь.* Теплоотдача к испаряющимся жидким пленкам /Чжунь, Се бан. — Труды Американского общества инженеров-механиков // Теплопередача. — 1971. — № 4. — С. 71—77.

ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ПРИСТЕННОМ СЛОЕ НИСХОДЯЩИХ ПЛЕНОК ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

М.О. Прядко, О.В. Глоба, А.В. Форсюк, В.З. Глоба
Национальный университет пищевых технологий

В статье обоснована гипотеза высокоэффективного теплопереноса в пленках яблочного сока. Определены условия и методика проведения исследования. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с данными других авторов и проанализированы причины различия. Результаты исследования теплогидродинамических процессов, в частности в пристенном слое, при нагревании высоковязкой жидкости и при ее концентрировании, когда жидкость стекает в виде пленки по внутренней поверхности вертикальных труб, позволили выявить особенности механизмов теплопереноса. Определено влияние на термическое сопротивление теплоотдачи геометрических и режимных параметров, а также теплофизических свойств рабочей жидкости. Проанализированы особенности физической модели и механизмов теплопереноса в пристенном слое жидкости, которые определяют его термическое сопротивление. Полученные результаты дополняют научно-техническую базу создания теплотехнологических установок.

Ключевые слова: *термическое сопротивление, теплоперенос, испарение, поверхностное кипение, яблочный сок.*