

FILM FLOWS IN TUBES OF APPELE JUICE EVAPORATORS

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

Key words:

Apple juice
Viscosity
Down stream film
Thickness
Structure and regime of
flow

ABSTRACT

The results of studies into the downstream film flows of apple juice during its concentration in modern evaporators are presented. It is shown that as the apple juice is getting more concentrated, the structure and physical models of film flows change. The data obtained may be added to the theoretical bases for the modern designing practice of thermal technological plants.

Article history:

Received 30.09.2014
Received in revised form
12.10.2014
Accepted 25.10.2014

Corresponding author:

M. Pryadko
Email:
npnuht@ukr.net

ПЛІВКОВІ ТЕЧІЇ В ТРУБАХ ВИПАРНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ЯБЛУЧНОГО СОКУ

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

У статті наведено результати досліджень низхідних плівкових течій яблучного соку в умовах його концентрування в сучасних випарних апаратах. Показано особливості структури і фізичної моделі низхідних течій, що проявляються з підвищенням концентрації соку. Отримані результати доповнюють науково-технічну базу створення тепло.

Ключові слова: *яблучний сік, в'язкість, низхідні плівки, товщина, структура і режими течій.*

В процесі проектування плівкових випарних апаратів для яблучного соку виникає ряд проблем розрахунку інтенсивності тепломасообміну, особливо для високих концентрацій соку. Це пов'язано з тим, що невідомі режими руху плівки, яка випаровується, початковий характер поверхні плівки та її зміна вздовж теплообмінної труби. Знання гідродинамічних режимів руху плівки яблучного соку дозволить позбутися помилок та припущень при розрахунку інтенсивності теплообміну та конструюванні випарних апаратів яблучного соку.

У зв'язку з означеними проблемами, на однотрубній моделі плівкового випарного апарата, авторами проведені експериментальні дослідження теплогідродинамічних процесів у діапазоні режимних параметрів, що відповідають умовам роботи випарних установок яблучного соку. Результати досліджень показали суттєву невідповідність інтенсивності тепловіддачі гідродинамічним умовам [3]. Першочерговою причиною такої невідповідності є особливості плівкових течій яблучного соку.

Одержані дослідні коефіцієнти тепловіддачі в низхідних плівках яблучного соку у широкому діапазоні теплових потоків не залежать від теплового потоку. Вважається, що це зона випаровування з вільної поверхні плівок і теплота від стінки труби до поверхні плівки переноситься в режимі однофазної конвекції [1, 2], а інтенсивність тепловіддачі залежить лише від теплофізичних властивостей соку та режимів течії плівки по нагрівній поверхні.

Метою проведеного дослідження було виявити особливості генерації і руху плівок яблучного соку для умов його концентрування в плівкових випарних апаратах сучасних випарних установок та дослідити особливості режимів течії і внутрішніх характеристик плівки залежно від витратних параметрів і теплофізичних властивостей соку. Також визначалась товщина плівки та чутливість плівкових течій яблучного соку до конструктивних особливостей і технічного стану генераторів плівки й поверхні теплообміну, що необхідно для конкретизації технічних вимог до основних вузлів випарних апаратів.

Для вирішення поставлених задач, було створено дослідний стенд, що включає вертикальний плоский лист із нержавіючої сталі шириною 250 мм і довжиною 1,2 м, вмонтований між боковими дошками. Для генерації плівки застосовувалися щілинний і переливний генератори. Передбачена можливість регулювання розміру щілини, рівня рідини в напірній посудині, загальних і місцевих витрат рідини в плівці. Для вимірювання товщини плівки застосовувався спеціальний щуп у складі мікрометричного гвинта і закріпленої на ньому медичної голки. Голка покривалася плівкою воску і продувалася повітрям низького тиску. Один щуп, основний, встановлювався на відстані 1 м від генератора плівки, інший, переносний — 0,75 м і 0,50 м. При потребі на каркасі кріпилася координатна дротяна сітка.

Перед стендом на відстані 6 м встановили потужний прожектор, а в його відбитих від плівок променях — екран. У променях прожектора на пластині контрастно висвітлювалися всі деталі плівкового рельєфу, а на екрані — його скелетне відображення. Це розширило результативність візуальних спостережень і можливості інструментального визначення структурних параметрів плівок.

Дослідження проводились при атмосферному тиску і температурі 10...35 °С. Для досліджень готувалися модельні розчини яблучного соку. За основний фактор приймалась в'язкість розчину. Контрольними параметрами при цьому були температура і вміст сухих речовин. Щільність зрошення змінювалася в інтервалі $(4,6...48) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Зауважимо, що в'язкість яблучного соку в процесі концентрування змінюється в десятки разів і в дуже широкому діапазоні. Для зручності аналізу сік концентрацією до 45% і в'язкістю до $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ вважа-

тимемо рідким. Результати вимірювання і спостережень порівнювалися з відомими даними.

На початку досліджень уточнили відомий факт залежності теплогідродинамічних процесів від стану нагрівної поверхні і виявили нестійкість відтворюваності результатів, зокрема мінімальної щільності зрошення. Після простою в резерві поверхня пластини погано змочується соком і він стікає струмками, тому для забезпечення надійності дослідних даних проводили лужне відмивання пластини й дослідної труби перед кожною серією дослідів і внесли цю процедуру до регламенту виробництва яблучного концентрату. Спостереження і результати вимірювання товщини плівок показують, що основний етап перебудови течії закінчується поблизу генератора плівки, як правило, не нижче 0,2 м. Ці результати збігаються з даними [2, 5] та інших дослідників, тому вплив пробігу плівки не враховувався.

Ламінарні плівки з гладенькою поверхнею в наших дослідях не спостерігалися. При найменших у дослідженому діапазоні витратах рідини поверхня плівок води і соку була вкрита хвилями. Плівкові течії рідкого яблучного соку змінюються залежно від витрат та властивостей рідини і загалом узгоджуються з описаними в літературних джерелах. Орієнтовно їх можна характеризувати залежно від числа Re_p :

- $Re_p < 100 \dots 200$ — стабільні плівки, вкриті рівномірною сіткою близьких до регулярних хвиль. Довжина хвиль приблизно 8...12 мм;

- $Re_p > 200$ — регулярність хвиль порушується, фронти хвиль стають крутішими, а «хвости» довгими, в течії з'являються ознаки нестабільності;

- $Re_p \geq 400$ — прокочуються великі хвилі з крутими фронтами і високими гребенями;

- $Re_p = 700 \dots 800$ — суцільні гребені великих хвиль часто простягаються на всю ширину листа. Прогин лінії фронту хвиль сягає 12...15 мм;

- $Re_p \geq 1000$ — сітки хвиль руйнуються і на короткий час зникають, потім знову створюються;

- $Re_p = 1300 \dots 2100$ — чергування стабільності-нестабільності, перехід до турбулентного режиму. Стійкої турбулентної течії ми не досягли.

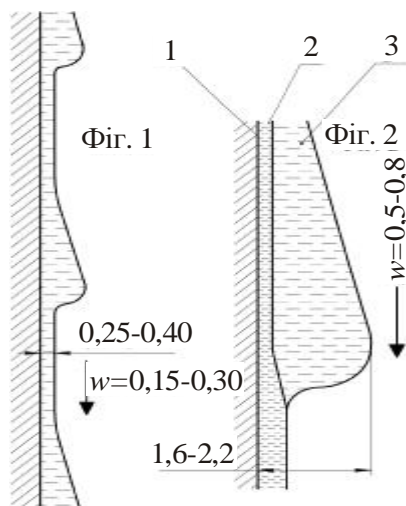


Рис. 1. Плівка яблучного соку $CP = 47\%$, $t = 12,5^\circ C$, $\Gamma_v = 28,8 \text{ м}^3/\text{с}$. 1 — пластина; 2 — тонка плівка; 3 — пласт

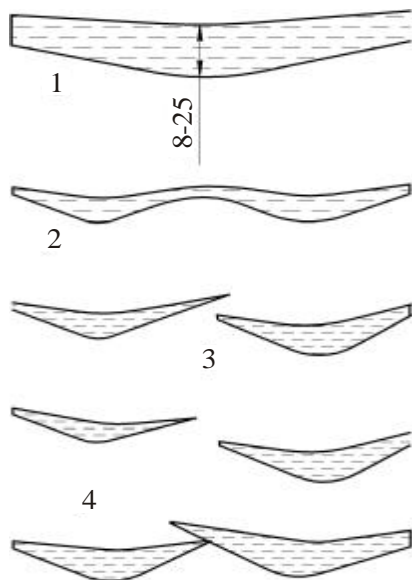
сприймається розшарованою. По поверхні пластини повільно і спокійно рухається тонка, ламінарна на вигляд плівка, а по ній швидко скочуються великі хвилі у вигляді відносно товстих пластів рідини. Збільшення витрат густого соку викликає загальне потовщення плівок, але не викликає нестабільності і переходу до турбулентного режиму, як це було з плівками рідкого соку, а призводить до зміни форми і структури плівок. Характерний

профіль плівки, побудований за результатами спостережень і зондування, показаний на рис. 1, де на фіг. 1 схематично зображено течію соку вдалині від генератора плівки, а на фіг. 2 — пласт рідини. В товстих швидкоплинних пластах переноситься велика кількість рідини, тому локальна щільність зрощення в тонкій плівці між пластами набагато нижча від загальноновитратної. Але тонка плівка між пластами завжди залишається суцільною.

У проекції на пластину рідинні пласти мають форму, близьку до прямокутної чи трапецевидної. Подібні між собою і близькі за розмірами пласти спливають більш-менш регулярно. В плівках соку помірних концентрацій пласти скочуються не хаотично, а циклічно, окремими групами в однаковому для візуального сприйняття наборі різних за розмірами і формою пластів. У циклах проглядається аналогія стабільності-нестабільності.

При високій в'язкості соку ($\nu \geq 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) пласти рідини приймають серповидну форму, розгортаються часто на всю ширину пластини (рис. 2, фіг. 1) і рухаються з інтервалом 40...100 мм і більше. Їх розмір в напрямку руху становить 8...25 мм, а товщина фронтальної зони в найнижчій точці — 1,6...2,2 мм. Видовжені пласти не сповзають, а перекочуються по тонкій залишковій плівці і вільна поверхня стелиться під пласт по всій його ширині. Поверхня пласта, як і тонкої плівки, майже завжди вкрита дрібними хвилями, рідина в його об'ємі повільно перемішується.

Серповидні пласти формуються під впливом бортів. Борти пригальмовують рух рідини, тому створюються косі хвилі і невеликий градієнт витрат рідини по ширині листа, що повільно зростає по шляху пробігу. Це свідчить про повільні поперечні перетоки рідини в пластах. Серповидна форма пласта спричиняється всім тим, що призводить до нерівномірного розподілу витрат рідини в плівці по ширині листа, наприклад, місцеве зменшення ширини (перетиск) генератора плівки. Спочатку під перетиском зменшуються товщина і глибина широкого пласта (рис.2, фіг. 2), а потім пласт поділяється на фрагменти, що вишиковуються колонами (рис.2, фіг. 3) відповідно до координат максимумів місцевих витрат рідини в плівці. Внутрішніми гілками пласти заходять в поле один одного. Пласти з більшими витратами рідини рухаються швидше, тому в місцях, де вони наздоганяють повільніші пласти і перетинаються з ними своїми гілками, відбувається злиття й утворення мішечка рідини, а іноді —



третьої колони пластів. Частіше такій ситуації відповідає перетиск щілини генератора плівки.

В інтервалі $\Gamma_v = (12...44) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ відриву крапель або конгломератів рідини з поверхні плівки чи створення вихрової зони на гребенях хвиль не спостерігалось. В розмірах і частоті проходження пластів, взагалі в рельєфі поверхні плівки, багато випадковостей.

Товщина рухомої плівки з рельєфною складною поверхнею в нерухомій контрольній точці під щупом безперервно змінюється і є трудомістким у відтворенні параметром. Надійність і

Рис.2. Пласти рідини

точність експериментальних даних забезпечувалася багатократним повторюванням зондування. Перед цим були довготривалі опанування інструментарієм і методикою вимірювань на конденсаті і рідких розчинах, результати яких коректно порівнювалися з відомими даними, які можна вважати таруванням комплексу досліджень. Характерні для всієї області досліджень результати вимірювання товщини плівок представлені на рис. 3. Досліди охоплюють весь діапазон варіювання концентрації соку у випарних апаратах. Відхилення від вказаних на графіку значень щільності зрошення не перевершує 4,6 %, максимальне відхилення від середнього значення товщини плівки менше 25 %. На графіках виразно відслідковується розшарування дослідних даних за витратами рідини в плівці, збільшення товщини плівки з підвищенням в'язкості соку і неоднозначність залежності товщини плівки від числа Рейнольдса.

Дослідна товщина плівок рідкого яблучного соку задовільно узгоджується з результатами розрахунку за співвідношенням для товщини плівки бурякового соку і розчину цукру [1]:

$$\delta = 2,17 \Gamma_v^{0,55} \rho^{-0,35} \nu^{0,1}. \quad (1)$$

Товщина плівок густого яблучного соку більша. Максимальне відхилення в більшу сторону експериментальних товщин плівки від розрахованих за (1) величин відповідає максимальній концентрації соку і досягає 20%. Експериментальні значення товщин плівок яблучного соку у всьому дослідженому діапазоні концентрацій і густин зрошення апроксимується залежністю:

$$\delta = 3,32 \Gamma_v^{0,55} \rho^{-0,3} \nu^{0,16}. \quad (2)$$

Яблучний сік і буряковий близькі за складом і теплофізичними властивостями. Логічно, що близькі за всіма параметрами формули (1) і (2).

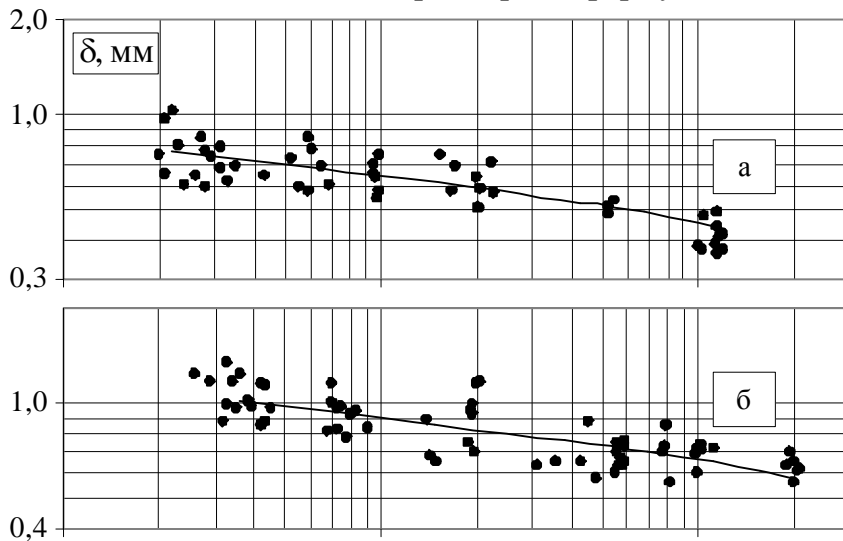


Рис.3. Товщина плівки яблучного соку: а — $\Gamma_v = 20 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; б — $\Gamma_v = 33 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

За приведеною товщиною плівки (рис. 4) наші дослідні дані в зоні ламінарно-хвильових плівок $Re < 1600$, як і результати [1], розподіляються по лінії,

близькій за нахилом до турбулентних течій [4] і не відхиляються в бік ламінарно-хвильових, як наприклад, у [6 і 8], та наближаються до результатів експериментальних досліджень [7]. Крива розподілу швидкості по товщині плівки за даними [7] в діапазоні $Re_p = 270 \dots 1600$ лежить між ламінарним і турбулентним потоками, розвинена турбулентність відсутня. Висновки [7] стосовно розподілу швидкості і режиму течії можна вважати дійсними для плівок яблучного соку концентрацією $CP < 45\%$. Плівки яблучного соку з більшим вмістом сухих речовин відрізняються структурою, режимом руху, товщиною, і, відповідно, механізмами перенесення маси й енергії.

Підсумовуючи викладені вище результати зазначимо, що рух плівок рідкого яблучного соку відносяться до ламінарно-хвильового режиму. Їхні течії можуть бути дво- і тривимірними. З підвищенням концентрації соку плівки розшаровуються, великі хвилі перетворюються в пласти. Настає режим чергування тонкої плівки і товстих пластів. Пласти швидко спливають по тонкому підшарку і в них, поблизу вільної поверхні, переноситься основна маса рідини. Механізми виникнення пластів у плівках густого соку аналогічні тим, що викликають великі хвилі в плівках рідини невисокої в'язкості.

Результати досліджень плівкових течій яблучного соку на плоских листах майже перенести на течії в круглих трубах. $\delta \cdot \left(\frac{g}{v^2}\right)^{1/3}$

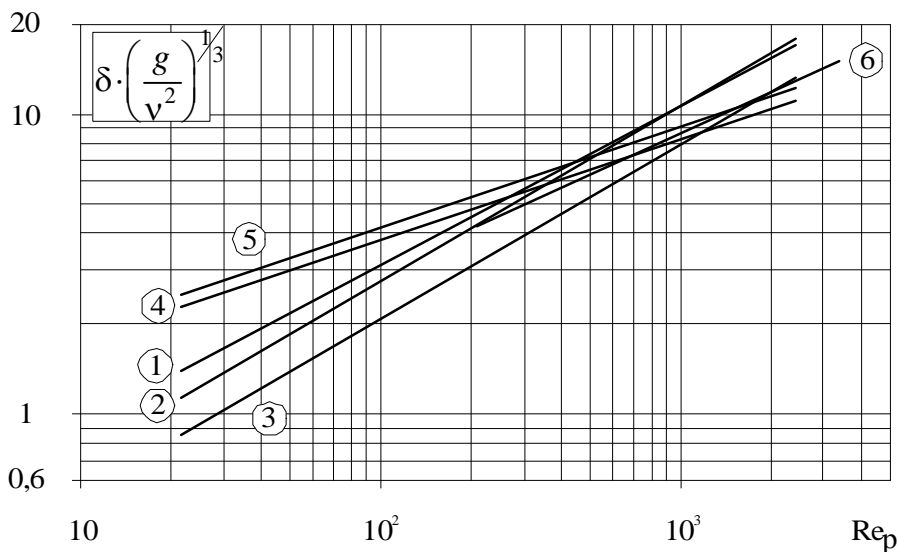


Рис.4. Приведена товщина плівок яблучного соку за співвідношеннями: 1 — автор, 2 — Ардашев А.В. [1], 3 — Живайкін Л.Я. [4], 4 — Фулфорд Г.Д. [8], 5 — Нусельт [6], 6 — Семена М.Г. [7]

У трубах промислових випарних апаратів завжди в якійсь мірі наявні не просто великі хвилі, а звернуті в кільця пласти рідини, близькі до тих, що виявлені на плоских листах. В діючих випарних апаратах плівка генерується методом переливання через поріг. Уникнути дефектів порогу не складно, але і в цьому випадку абсолютно рівномірно розподілити зрошуючу рідину по периметру труби майже неможливо. Шар рідини навколо порогу збурений струменями з решета, дуже динамічний і викликає коливання місцевих вит-

рат рідини та певну нерівномірність щільності зрошення по периметру порогу.

Рідина переливається через поріг в круглу трубу загалом у радіальному напрямі. Напрямок розповсюдження хвиль у збуреній перед порогом рідині не збігається з радіальним. На порозі плівка не заспокоюється, як у щільному генераторі, і в трубу переливається з динамічною поверхнею і з локальними відхиленнями щільності зрошення. В трубі невеликі відхилення швидко самоликвідуються. Дрібні дефекти поверхні плівки закриваються, локальні збурення гасяться, течія вирівнюється по периметру. До цього долучається й поверхневий натяг. Висока в'язкість соку і дисипація енергії гасять генеровані на переливному порозі високочастотні коливання в ланці гідродинамічної стабілізації. На внутрішній поверхні круглої труби швидкість вирівнювання структурних параметрів плівки не нижча, ніж на плоскому листі.

Отже, можна стверджувати, що форма поверхні, структура і товщина плівки, швидкість і режими течії на внутрішній поверхні вертикальної труби подібні і за абсолютними значеннями основних параметрів близькі до тих, що спостерігалися на вертикальній пластині. Зважаючи на це, результати досліджень плівок на пластині придатні для оцінки механізмів та інтенсивності масо- і теплоперенесення в трубах.

Фізична модель плівкових течій яблучного соку у вертикальних трубах суттєво змінюється в процесі концентрування соку. Складно визначити режим руху плівок густого соку. За гідродинамічними параметрами це ламінарно-хвильові чи й ламінарні плівки, але за структурою і рельєфом поверхні вони навіть віддалено на такі не схожі. В той же час не проявляються турбулентні динамізм і хаотичність руху. Тонка ламінарно-хвильова плівка і пласти рідини спливають спокійно й упорядковано. Результати спостережень і аналізу показують, що пласти скочуються, рух рідини в їхній фронтальній зоні (лише фронтальній) обертовий, а режим течії, ймовірно, турбулентний.

Середня товщина плівки яблучного соку, особливо густого, не є тим вирішальним параметром, який повністю характеризує структуру чи однозначно визначає топографічні параметри поверхні. В процесі концентрування соку всі характеристики плівок змінюються. Все ж товщина плівки формально залишається основним її параметром, визначальним для інтенсивності тепловіддачі і втрат тиску. Результати досліджень плівкових течій дають змогу більш достовірно визначитися з тими механізмами перенесення маси і теплоти в плівках рідини, які спостерігаються в парогенеруючих трубах випарних апаратів яблучного соку, та з методикою розрахунків втрат тиску вздовж парогенеруючої труби, уточнити вихідні дані для розроблення обладнання і технологічних процесів концентрування яблучного соку та інших високов'язких розчинів.

Висновки

Плівки рідкого соку з достатнім наближенням можна віднести до ламінарно-хвильових. Плівки густого соку відрізняються за формою

поверхні, структурою, швидкістю і режимом руху, товщиною, розподілом швидкості. Одержана формула для розрахунку товщини плівки в трубах випарних апаратів яблучного соку.

Результати роботи можуть бути використані для розрахунку тепломасообміну під час концентрування інших соків та розчинів, однак потребують уточнення та повторних досліджень у кожному конкретному випадку.

Література

1. *Ардашев В.А.* Исследование теплообмена при выпаривании гравитационно стекающей плёнки жидкости в вертикальных трубах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / КТПП. — К., 1983. — 26 с.
2. *Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М.* Теплообмен в жидкостных плёнках. — К.: Техніка, 1972. — 196 с.
3. *Глоба О.В.* Теплогідродинамічні процеси у плівкових випарних апаратах для яблучного соку: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / НУХТ. — К., 2011. — 20 с.
4. *Живайкин Л.Я.* О толщине пленки жидкости в аппаратах пленочного типа / Живайкин Л.Я. — Химическое машиностроение. — 1961, № 6. — С. 25—29.
5. *Марценюк О.С.* Вплив коливально-хвильових явищ на інтенсивність масовіддачі в плівці рідини. / О.С. Марценюк. — Наукові праці НУХТ. — № 15. 2004. — С. 85—88.
6. *Nusselt W.* Die Oberflächen Kondensation des Wasserdampfes. / Nusselt W. — Zeitschrifts VDJ, Bd. 60. — S. 541—546, 568—575.
8. *Fulford G.D.* The flow of liquids in thin films. / G.D. Fulford. Advance in Chemical Engineering. Bd.5, N-Y / London Academic Press, 1964. — P. 151—256.
7. *Семена М.Г.* Исследование распределения средних скоростей стекающей пленки жидкости. / М.Г. Семена, Г.А. Мельничук — Изв. ВУЗов, серия Энергетика. — 1978, № 5. — С. 143—147.

ПЛЕНОЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ТРУБАХ ВЫПАРНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЯБЛОЧНОГО СОКА

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

В статье представлены результаты исследования нисходящих пленочных течений яблочного сока в условиях его концентрирования в современных выпарных аппаратах. Показаны особенности структуры и физической модели нисходящих течений, которые проявляются с повышением концентрации сока. Полученные результаты дополняют научно-техническую базу создания теплотехнологических установок.

Ключевые слова: *яблочный сок, вязкость, нисходящие пленки, толщина, структура и режымы течений.*