

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

На правах рукопису

УДК 536.242

ФОРСЮК Андрій Васильович

ТЕПЛООБМІН ПРИ ВИПАРОВУВАННІ З ПОВЕРХНІ ГРАВІТАЦІЙНО-
СТІКАЮЧИХ ПЛІВОК ЯБЛУЧНИХ СОКІВ.

05.14.04. «Промислова теплоенергетика»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Київ-1996.

Робота виконана в Українському Державному університеті харчових технологій.

Наукові керівники- доктор технічних наук, професор М.О.Прядко;
кандидат технічних наук, доцент С.М.Василенко.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор С.Й.Ткаченко;
кандидат технічних наук, нач.відділу УНДІЦП А.О.Князєв.

Провідна організація - Український НДІ продовольчого машинобудування.

Захист дисертації відбудеться «__»_____1996 року в
__ годин на засідінні спеціалізованої ради К 01.15.03 при Українському Державному університеті харчових технологій, 252033, Київ-33, Володимирська, 68, спеціалізовані ради УДУХТ, ауд.311.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Університету.

Автореферат розісланий «__»_____1996 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої Ради
канд.тех.наук

В.М.Філоненко

Актуальність роботи. Виробництво концентрованих соків набуло широкого розповсюдження у всьому світі. Зберігання та транспортування концентрованих соків дає значну економію тари, вантажно-розвантажувальних та транспортних засобів, дозволяє створювати виробничий резерв на роки з низьким врожаєм плодів. Шляхом концентрування вміст розчинних сухих речовин в соках підвищується до 70-75% (для освітлених соків) об'єм соків при цьому відповідно зменшується у 5-6 разів. Концентрування соків здійснюється наступними методами: випарюванням, кріоконцентруванням або ж з використанням мембранної технології. Особливу увагу в процесі концентрування приділяють збереженню натуральних властивостей соків (вітамінів, мікроелементів, амінокислот т.ін.).

Найбільш простий та дешевий спосіб, який отримав широке поширення, - випарювання. Він дозволяє отримувати концентрати з необхідним вмістом сухих речовин при мінімальному впливі на споживчі властивості соків.

Для збереження натуральних характеристик соків випарювання проводять при можливо низьких температурах насичення. Слід також врахувати, що суттєвими факторами, які визначають якість концентрату, є час контакту продукту з гарячою поверхнею та величина перегріву соку в граничному шарі відносно температури насичення, тому що негативний вплив високих температур на продукт, що концентрується, позначається перш за все на його кольорі, зміна якого (потемніння) пов'язана з утворенням в присутності цукрів та кислоти оксиметилфурфурола з наступним перетворенням в темні продукти конденсації.

Вказані фактори визначають характер гідравлічних схем випарних апаратів та випарних установок, з допомогою яких здійснюється процес концентрування соків.

Основним вимогам технологічного процесу згущення соків, як було зазначено вище, - мінімальному часові перебування соку в зонах з підвищеними температурами та мінімально можливій температурі проведення процесу, задовольняють випарники плівкового типу, в яких процес концентрування відбувається в тонкій пристінній плівці рідини, рух якої вздовж поверхні теплообміну проходить, в першу чергу, за рахунок гравітаційних сил.

Випарні апарати з гравітаційно стікаючою плівкою рідини характеризуються також своєю конструктивною простотою, технологічністю в виробництві, можливістю

створення на їх базі багатокорпусних випарних установок, що відрізняються високою ефективністю, відсутністю гідростатичної температурної депресії, щой обумовило їх широке розповсюдження в промисловості.

На даний час в літературі дані про систематичні дослідження теплогідродинамічних режимів роботи плівкових випарників для концен-трування плодових соків надзвичайно обмежені. У відповідній області параметрів двофазного кільцевого потоку з випаровуванням механізм процесів переносу досліджений недостатньо, а рекомендовані розрахункові залежності для розрахунку локальної тепловіддачі не охоплюють повністю вказаної області. Дані про граничні режими роботи випаровувачів практично відсутні.

Мета роботи: 1. Дослідити експериментально процес тепловіддачі до стікаючих плівок плодових соків в режимі випаровування з вільної поверхні в діапазоні тисків, характерних для роботи промислових випарників.

2. Дослідити граничні режими роботи випарників, визначити граничні густини зрошення теплопередаючої поверхні в заданому діапазоні температур та густин соку.

3. Створити методики визначення основних локальних теплогідро-динамічних характеристик процесу випаровування в кільцевому потоці, що дозволить замкнути математичну модель переносу енергії та імпульсу в кип'ятільних трубах плівкових випарних апаратів.

4. Створити фізично обгрунтовану методику розрахунку плівкових випарних апаратів для концентрування плодових соків.

Наукова новизна.

- проведено експериментальне дослідження дискретно-локальних теплогідродинамічних характеристик процесу випаровування з поверхні гравітаційно стікаючих плівок яблуневого соку при наявності супутного парового потоку;
- розроблена математична модель процесів переносу енергії та імпульсу в турбулентній плівці рідини, адекватна фізичній картині цих процесів;
- встановлено факт турбулізуючої дії на плівку рідини парового потоку та поперечного міжфазного потоку маси у всьому діапазоні витратних характеристик плівки;
- запропонована емпірична розрахункова залежність для визначення інтенсивності тепловіддачі при випаровуванні;

- запропонована методика визначення дотичної напруги на поверхні розподілу фаз кільцевого потоку, яка враховує залежність між цією дотичною напругою та еквівалентною шорсткістю;
- встановлено дві області характерного впливу міжфазної дотичної напруги на величину еквівалентної піщаної шорсткості стікаючої плівки.

Практична цінність. Розроблені узагальнюючі залежності та методики, що дозволяють :

- визначати інтенсивність теплопереносу при турбулентному режимі течії плівки соку в широкому діапазоні зміни витратних параметрів паро-рідинного потоку та величини міжфазної дотичної напруги характерної для умов роботи випарників сокової промисловості;
- визначати дотичну напругу на межі розподілу фаз, а також втрати тиску в кільцевому потоці при випаровуванні гравітаційно стікаючих плівок.
- побудувати інтервально-ітераційну методику розрахунку кільцевої течії з випаровуванням в плівковому апараті.

Реалізація науково-технічних результатів. Основні науково-технічні результати роботи передані Українському НДІ продовольчого машинобудування для розробки вітчизняної випарної станції концентрування плодово-ягідних соків. Результати роботи були використані при проектуванні та виготовленні технічної документації Смілянським філіалом УНДІПМ для виробництва такої станції.

Апробація роботи. Результати роботи доповідались на 5 науково-технічних конференціях УДУХТ та міжнародній конференції по розробці та впровадженню нових технологій та обладнання у харчову промисловість 1993 року.

Основний зміст роботи опублікований в 5 друкованих роботах.

Структура та об'єм дисертації. Робота вміщує 100 стор. Машинописного тексту, 55 рисунків, 8 таблиць. В списку літератури 154 назви. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обгрунтована актуальність роботи.

В першому розділі проведений аналіз стану досліджень переносу енергії та імпульсу в плівкових течіях та достовірності використання їх результатів для

описання процесів випаровування з поверхні гравітаційно стікаючих плівок при наявності супутного парового потоку в трубах промислових випарних апаратів. Аналітичний огляд моделей переносу енергії та імпульсу, наведений у цьому розділі, дозволяє зробити висновок, що використання практично всіх їх може призвести до значних похибок при розрахунку процесів в досліджуваному діапазоні параметрів потоків.

Наведено аналіз результатів робіт по експериментальному дослідженню процесів переносу, що відбуваються в плівках. Зроблено висновок, що залежності для розрахунку середньої тепловіддачі дійсні в обмеженій області зміни витратних параметрів потоку, а їх використання призводить до результатів, що суттєво різняться.

З аналізу результатів робіт, присвячених дослідженню локальної тепловіддачі при випаровуванні з поверхні гравітаційно стікаючих плівок всередині труб встановлено, що область зміни режимних параметрів потоку, характерних для роботи випарників сокової промисловості, досліджена недостатньо, а поширення їх результатів на цю область призводить до суттєво відмінних результатів.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету та об'єм дослідження.

Другий розділ містить опис експериментальної установки, викладена методика проведення дослідів, обробки даних, наведена оцінка погрішності вимірів основних величин. Схема установки наведена на рис.1.

Сік, що підлягав концентруванню, з певним, попередньо заданим вмістом сухих речовин, подавався з напірної місткості 1 через ротаметри 3 та паровий підігрівник 2, де нагрівався до температури кипіння, у вхідну камеру 4. Для рівномірного заповнення вхідної камери сік подавався через два діаметрально протилежні штуцери, обладнані на виході сітчатими фільтрами.

З вхідної камери сік методом переливу зрошував тонкою плівкою внутрішню поверхню дослідної труби 6 з нержавіючої сталі 10ХТ18НТ внутрішнім діаметром 28 мм та товщиною стінки

2 мм. Перед ділянкою труби, що нагрівалась, довжиною 3 м, була ізотермічна ділянка стабілізації плівки довжиною 100 мм. Конденсат, що міг утворюватись на поверхнях вхідної камери, відводився через штуцер 7.

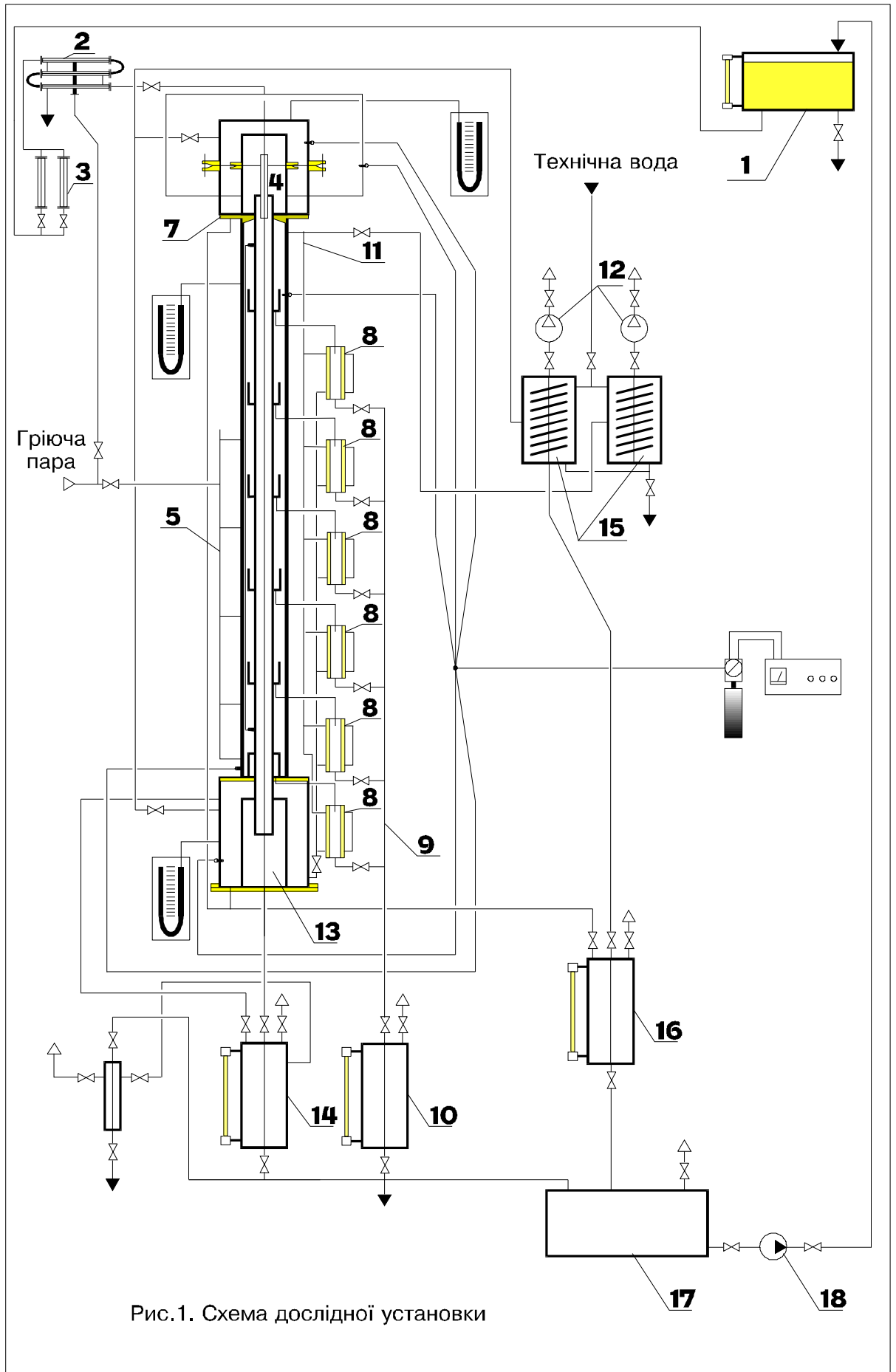
Дослідна труба підігрівалася ззовні насиченою парою, що надходила в паровий простір моделі через сепаратор гріючої пари 5. Конденсація гріючої пари

проходила на поверхні дослідної труби, розділеної на шість рівних за довжиною ділянок по 500 мм кожна. Конденсат, що утворювався на зовнішній поверхні ділянок труби під час дослідів, відводився на мірники 8, де визначалась його кількість. Парова камера та мірники були виготовлені таким чином, щоб конденсат з їх внутрішніх поверхонь, відводився через трубу 9 в окремий збірник 10. Для встановлення в мірниках тиску, рівного тиску в паровій камері, вони з'єднувались з останньою за допомогою труби 11. Для відведення газів, що не конденсуються, та для зміни тиску грючої пари, було застосовано вакуум-насос 12.

Сік, що згущувався на внутрішній поверхні дослідної труби, та вторинна пара, що при цьому утворювалась, потрапляли після виходу з труби у камеру 13, де проходило їхнє розділення. Сік стікав у мірник 14, а пара відводилась в поверхневий конденсатор 15. Кількість конденсату вторинної пари визначалось мірником 16. Після заміру кількості згущеного соку та конденсату вторинної пари вони відводились на збірник 17, з якого насосом 18 перекачувались в збірник 1. Конденсатор 15 був з'єднаний з вакуум-насосом 12

Конденсат, що утворювався на стінках камери 13, відводився в мірник 17. В дослідній установці була можливість відбору проб соку з камери 13 на лабораторні аналізи.

Температура стінки дослідної труби вимірювалась в середньому перерізі кожної ділянки двома мідь-константовими термopарами.



Вимірювання температур: гріючої пари, соку на вході в дослідну трубу, вторинної пари проводилось встановленими мідь-константовими термопарими. Температура вторинної пари по довжині труби вимірювалась термозондом з мідь-константових термопар, що дозволяло вимірювати її у чотирьох точках.

В *третьому розділі* міститься аналіз та узагальнення результатів експериментального дослідження дискретно-локальних характеристик тепловіддачі при випаровуванні з поверхні гравітаційно стікаючих плівок всередині вертикальної труби. Дискретно-локальними вважались пересічні по довжині ділянки значення параметрів. В експериментах тиск вторинної пари змінювався в межах $0,3 \times 10^5 \leq P_n \leq 0,7 \times 10^5$ Па, тепловий потік встановлювався в діапазоні $5,0 \leq q \leq 60$ кВт/м², швидкість пари $0 \leq \omega_n \leq 60$ м/с; масовий витратний паровміст $0 < x \leq 0,5$; число Рейнольдса $0 < Re_\delta \leq 350$, $\tau_f = 0 \dots 20$ н/м².

Встановлено, що в практично у всій області зміни витратних характеристик рідкої фази спостерігається турбулентний режим течії плівки, що пояснюється дестабілізуючою дією на плівку руху парового ядра та поперечного потоку маси. В цьому режимі дослідні дані аналізувались як для перевірки адекватності моделі переносу теплоти та імпульсу в плівці, так і з метою отримання емпіричної залежності між дискретно-локальними теплогідродинамічними характеристиками течії, які можуть бути використані для побудови одномірної інженерної моделі процесу.

Для попередніх інженерних розрахунків рекомендується використовувати одномірну інтервально-ітераційну модель. Залежність для визначення коефіцієнтів тепловіддачі визначалась шляхом апроксимації дослідних даних у вигляді комплексу безрозмірних чисел подібності, запропонованих Карпентером-Колборном. Результуюча формула має вигляд:

$$St = 0.0356 Pr^{-0.469} \quad (1)$$

Як видно з рис.2. відповідність дослідних даних розрахунковим, в усьому дослідженому діапазоні витратних параметрів потоку, задовільна з розбігом +28% , - 23%. Використовувати запропоновану залежність слід лише у випадку приблизних

кількісних розрахунків, коли якісний аналіз процесу не входить в задачу моделювання.

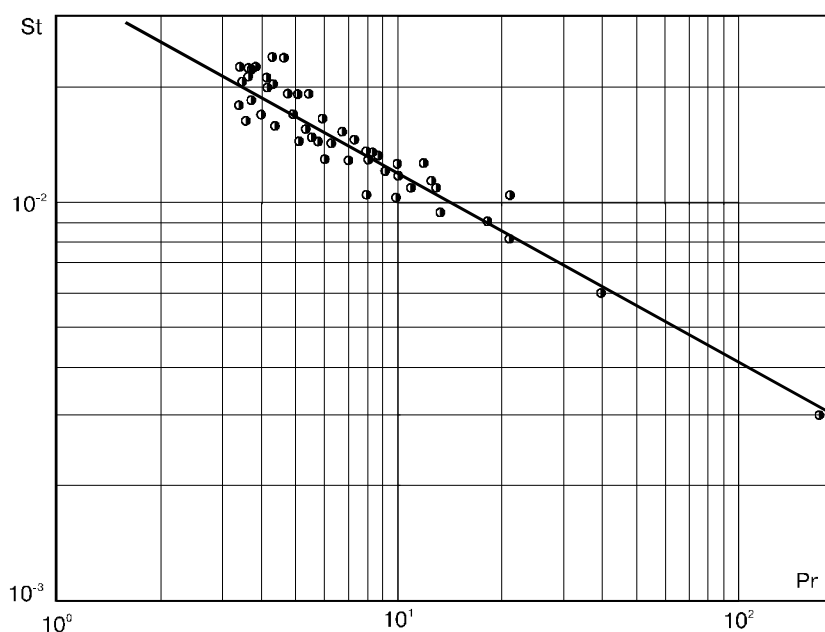


Рис.2. Емпірична залежність числа Стентона від числа Прандтля, отримана в даній роботі.

При якісному аналізі дослідних даних проведено порівняння моделі, що розглядає переніс в плівці по аналогії з переносом в пристінному шарі однофазного потоку рідини, що рухається в трубі, з запропонованими моделями, що враховують придушення турбулентності на міжфазній межі. Всі розглянуті моделі локальної тепловіддачі різняться між собою виглядом заключних рівнянь, що визначають зміну турбулентної вязкості по перетину плівки. У всіх моделях не враховувались інерційні та конвективні члени в рівняннях переносу, оскільки, як показав попередній аналіз, вплив їх несуттєвий.

В першій моделі плівка розглядалася як пристінна частина однофазного потоку в трубі. В основу цієї моделі покладено профіль турбулентної вязкості, що відповідає трьохшаровій моделі “універсального профілю швидкості” Кармана-Нікурадзе, при умові постійності по товщині плівки дотичної напруги та рівності її дотичній напрузі на стінці.

Система безрозмірних параметрів, що описують тепловіддачу у кільцевих течіях, при застосуванні моделей універсального типу з припущенням постійної дотичної напруги по товщині плівки набуде вигляду:

$$St=f(Pr_p, Re_p). \quad (2).$$

На рис.3 та рис.4 в цій системі параметрів наведено порівняння розрахунку по моделі 1 з дослідними даними для різних значень чисел Pr .

Як видно з рисунків, у всьому дослідженому діапазоні зміни витратних характеристик рідкої фази, розрахункова крива моделі 1 перевищує дослідні значення коефіцієнта тепловіддачі (до 45%), що пояснюється впливом придушення турбулентності в плівці рідини поблизу міжфазової межі.

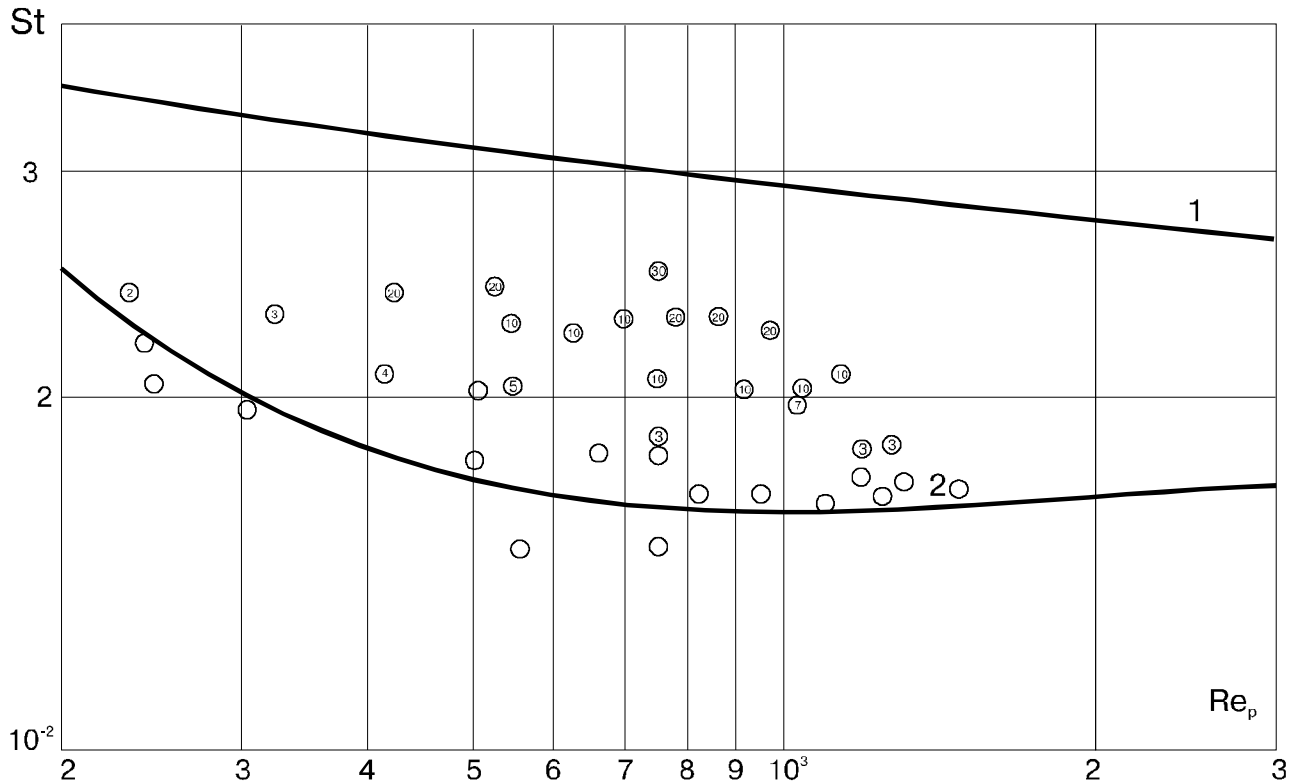


Рис.3. Залежність $St=f(Re_p)$. $Pr = 4$. 1- модель 1; 2- модель 2;
 ⊙ - дослідні дані з вказаною дотичною напругою.

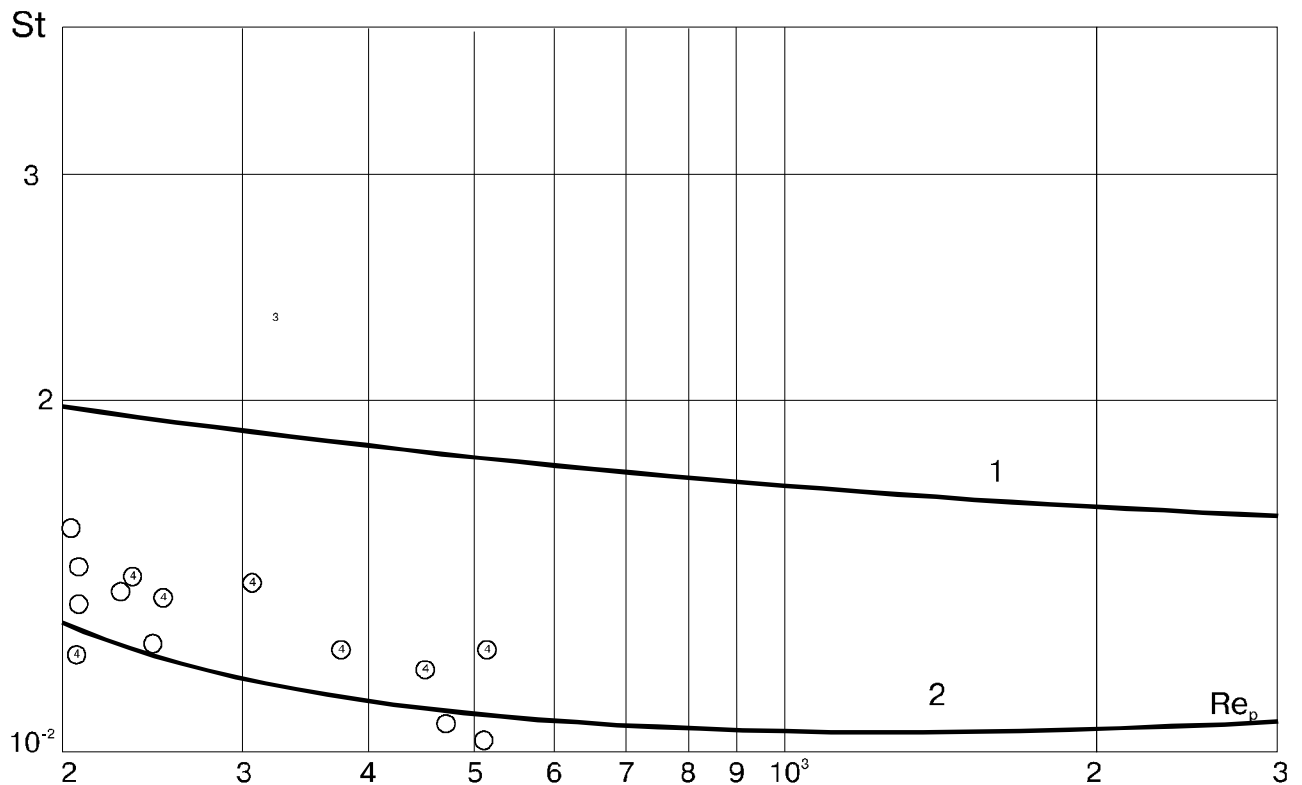


Рис.4.Залежність $St=f(Re_p)$. $Pr = 8$

1- модель 1; 2- модель 2;

○- дослідні дані з вказаною дотичною напругою.

Запропоновані друга та третя моделі для врахування останнього фактора замикаються додатковими рівняннями, які описують зміну профілю турбулентної вязкості в плівці поблизу межі пар-рідина. При цьому плівку розбиваємо на дві зони:

1) пристінна зона, в якій величини турбулентної вязкості та температуропровідності визначаються із співвідношення для пристінного шару однофазної течії рідини в круглій трубі;

2) зона затухання турбулентності, в якій коефіцієнт турбулентного переносу змінюється від певної величини в точці y_e^+ , на межі зон, до нуля на поверхні плівки; в цій зоні модель додатково враховує зміну дотичної напруги в перерізі плівки.

$$\tau = \tau_{ст} - \rho_p g y \quad (3).$$

Координата y_e^+ відповідає точці перетину профілю турбулентної вязкості зони затухання турбулентності та пристінної зони.

Безрозмірні числа Re та St при цьому визначаються позонним інтегруванням:

$$Re_p = 4 \int_0^{y_e^+} \omega_p^+ dy^+ + 4 \int_{y_e^+}^{\delta^+} \omega_p^+ dy^+ \quad (4)$$

$$St^{-1} = (T^+)_{y_e^+} + T^+ \Big|_{y_e^+}^{\delta^+} \quad (5)$$

Для опису профілю турбулентної вязкості в зоні затухання турбулентності використано результати експериментального дослідження турбулентної дифузії в плівках рідини [1].

В безрозмірному вигляді він запишеться наступним чином:

$$v_T^+ = \text{const} \times \delta^+ \times (\delta^+ - y^+)^2 \quad (6).$$

Для визначення const модифікуємо результати дослідження абсорбції газів вільно стікаючою плівкою води, модифікованими для випадку рідини з іншими фізичними властивостями з урахуванням виразу Брьоца для товщини турбулентно стікаючої плівки рідини $Re_p = 57,2 \delta^+$ [2]. Результуюче рівняння набуло вигляду:

$$v_T^+ = 0,5752 Ar_B^{-1/3} \times \delta^+ (\delta^+ - y^+)^2 \quad (7).$$

В цьому випадку профіль швидкості в зоні затухання турбулентності описується наступним чином:

$$\omega_p^+ = \frac{1}{\sqrt{a}} \times \arctg[(\delta^+ - y^+) \times \sqrt{a}] \times \left[\left(\frac{\delta^+}{\tau_{CT}^{*3/2}} \right) - 1 \right] - \frac{\ln[1 + a(\delta^+ - y^+)^2]}{2a \times \tau_{CT}^{*3/2}} + c, \quad (8)$$

де постійна інтегрування визначалась за умови $\omega_p^+ = \omega_{ep}^+$ при $y^+ = y_e^+$.

Знаючи розподіл швидкості, можна визначити значення другого члена в рівнянні (8)

$$\begin{aligned}
4 \int_{y_e^+}^{\delta^+} \omega_p^+ dy^+ &= \frac{4 \left[\left(\frac{\delta^+}{\tau_{c\tau}^*} \right)^{3/2} - 1 \right]}{\sqrt{a}} \times \\
&\times \left\{ \frac{1}{2\sqrt{a}} \ln \left[(\delta^+ - y^+)^2 a + 1 \right] - (\delta^+ - y^+) \times \arctg \left[\sqrt{a} (\delta^+ - y^+) \right] \right\}_{y_e^+}^{\delta^+} + \frac{2}{(a\tau_{c\tau}^*)^{3/2}} \times \\
&\times \left\{ \sqrt{a} (\delta^+ - y^+) \times \ln \left[(\delta^+ - y^+)^2 a + 1 \right] + 2 \arctg \left[\sqrt{a} (\delta^+ - y^+) \right] - 2\sqrt{a} (\delta^+ - y^+) \right\}_{y_e^+}^{\delta^+} + \\
&+ 4cy^+ \Big|_{y_e^+}^{\delta^+} \quad (9)
\end{aligned}$$

При розрахунку числа St значення турбулентного числа Pr_τ в пристінній області прийняли рівним 1, а в області затухання - 0,9 [2]. При цьому другий інтеграл в правій частині рівняння набуде вигляду:

$$T^+ \Big|_{y_e^+}^{\delta^+} = - \frac{Pr_p}{\sqrt{\frac{a Pr_p}{Pr_\tau}}} \times \arctg \left[\sqrt{\frac{a Pr_p}{Pr_\tau}} \times (\delta^+ - y^+) \right]_{y_e^+}^{\delta^+} \quad (10).$$

Виходячи з універсального профілю швидкості визначався перший інтеграл в правій частині (4), а з відповідного йому розподілу турбулентної вязкості перший інтеграл в правій частині (5).

Порівняння розрахунків по моделі 2 з експериментальними даними нашого дослідження наведені на рис.3 та 4.

Як видно з рисунків практично у всьому діапазоні зміни Re_p та τ_i^* дослідні дані перевищують розрахункові. Причини цього в наступному:

а) при визначенні $const$ в (6) модифікація результатів дослідження абсорбції газів проводилася не на основі експериментальних досліджень, а відповідно теорії Левича В.Т. По-друге, очевидно, на інтенсивність придушення турбулентності повинна вплинути міжфазна дотична напруга; зі збільшенням τ_i товщина зони затухання повинна зменшуватись, що призведе до відносного збільшення коефіцієнта тепловіддачі в порівнянні з розрахунками, які не враховують цього фактору.

Модель 3 відрізняється від моделі 2 виглядом рівняння, що визначає профіль коефіцієнта турбулентного переносу в зоні затухання турбулентності. Для цього модифікуємо кореляційну формулу, що узагальнює результати дослідження абсорбції газів плівкою рідини в широких межах зміни властивостей рідини при наявності на поверхні розподілу фаз дотичної напруги, що змінюється від 0 до величини, співрозмірної з силами тертя з використанням виразу Брьоца для товщини плівки, яка в результаті набуде вигляду:

$$v_t^+ = 8,13 \times 10^{-17} \times Ar_{жв} \frac{(g \times v_p)^{2/3}}{u_*^2} \times Re_p^{2n} \left[1 + 14,88b \times \tau_i^* \times Re_p^{-2/3} \right]^2 (\delta^+ - y^+)^2 \quad (11)$$

де $n = 6,95 \times 10^2 \times (v_p)^{1/2}$, $b = 0,9 + 1,73 \times 10^{12} \times v_p^2$, а величина τ_ω^0 - дотична напруга на стінці при вільній течії плівки.

Профілі зміни турбулентної вязкості, швидкості та температури по перерізу плівки наведені на рис 5,6,7.

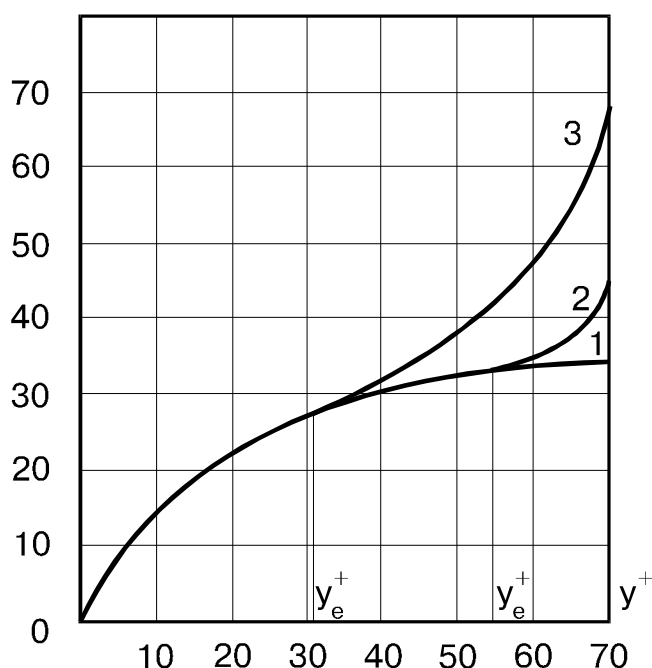


Рис.5. Профіль температур в плівці.
 $Pr_p = 4.0$. 1- модель 1; 2- модель 3, $\tau_i^* = 60$;
 3- модель 3, $\tau_i^* = 0$.

Порівняння розрахунків по даній моделі з нашими експериментальними даними представлено на рис.8 та рис.9. В більшій

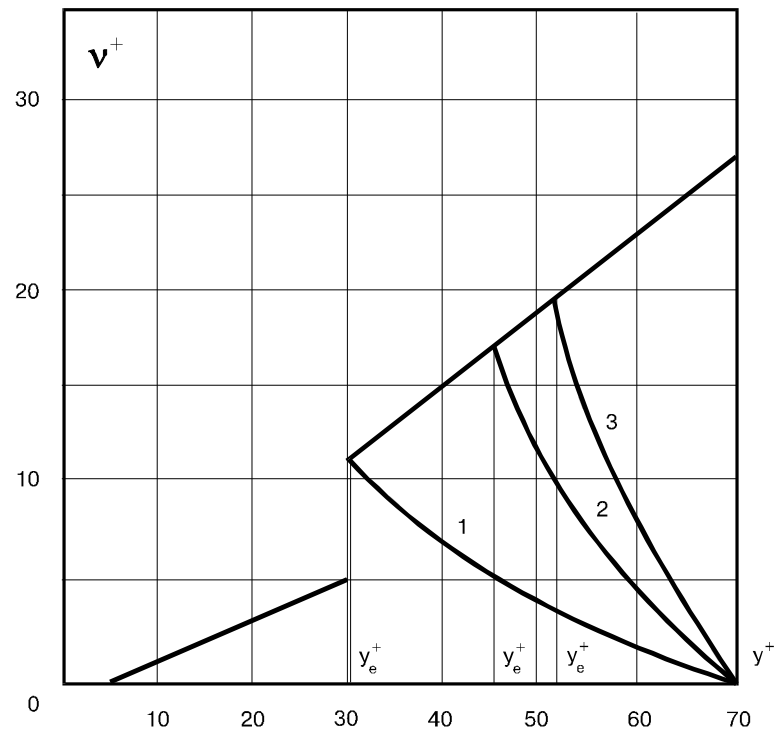


Рис.6. Розподіл коефіцієнта турбулентної вязкості в плівці. $Pr = 4.0$.

1- $\tau_w^+ = 0$; 2- $\tau_w^+ = 20$; 3- $\tau_w^+ = 40$.

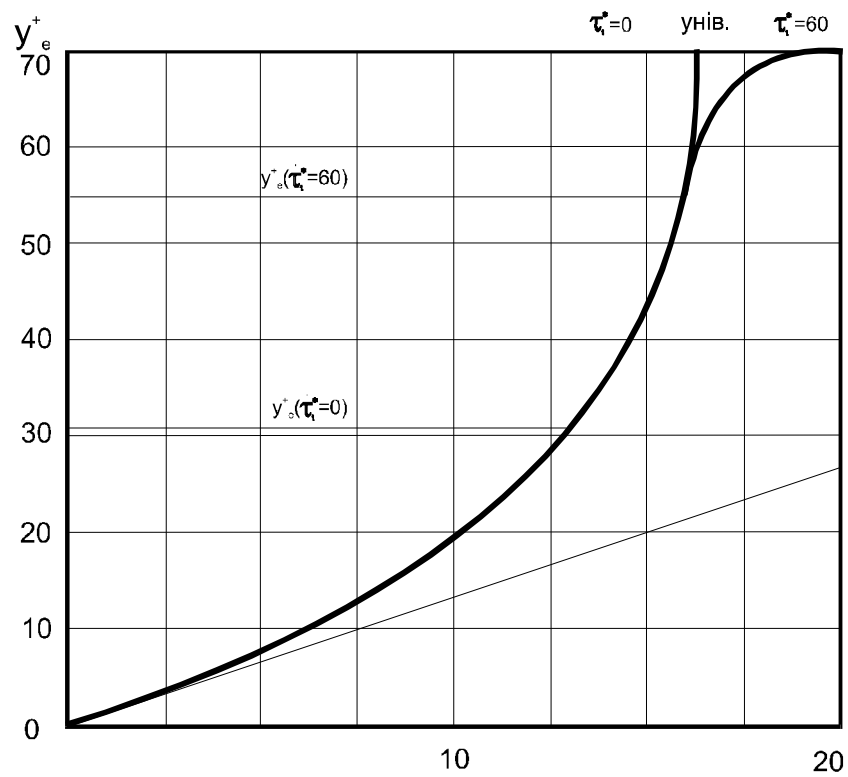


Рис.7. Профілі швидкості в плівці при розвинутій турбулентній течії плівки (модель 3, $Pr = 4.0$)

частині діапазону зміни витратних характеристик парорідинного потоку спостерігається задовільне співпадання розрахункових та дослідних даних.

Саме врахування цієї моделлю впливу міжфазної дотичної напруги та фізичних властивостей рідини на процеси переносу в плівці лежить в основі вищевказаного співпадання розрахункових та дослідних величин.

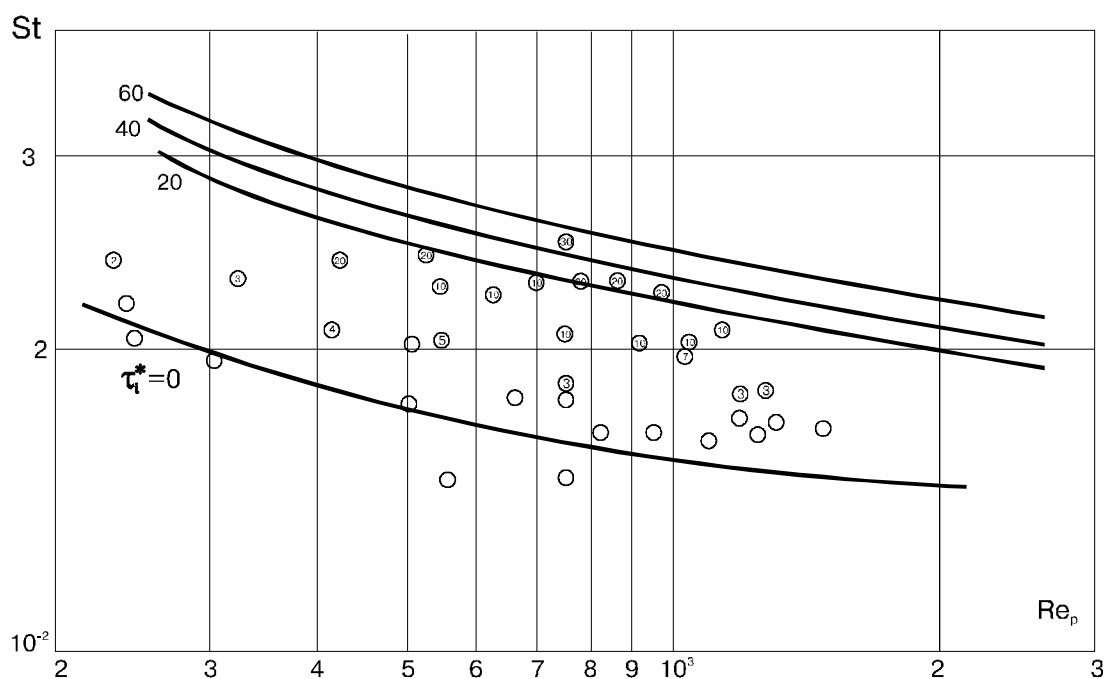


Рис.3.15,а.Залежність $St=f(Re_p)$. $Pr = 4$.

1- модель 1;

2- модель 2;

⊙- дослідні дані з вказаною дотичною напругою.

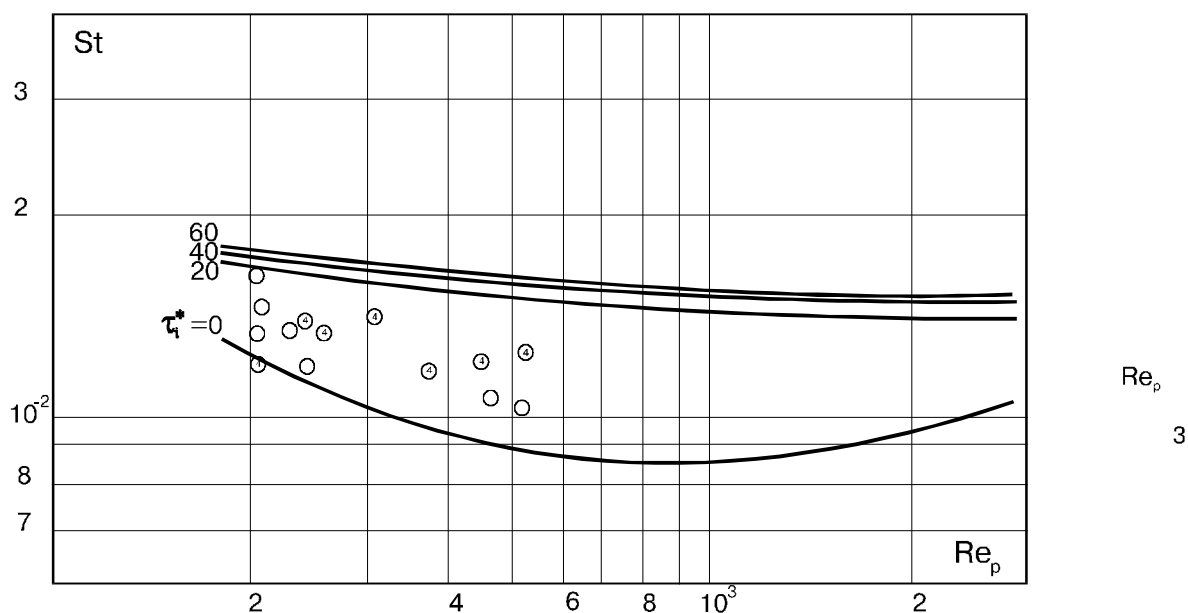


Рис.9.Залежність $St=f(Re_p)$ за моделлю 3. $Pr=8$.

Слід зауважити, що аналіз результатів розрахунків гідродинамічних характеристик плівки за моделями свідчить, що придушення турбулентності впливає на гідродинаміку плівкової течії в значно меншій мірі, ніж на теплопереніс. Так, значення товщин плівки, розраховані по першій та третій моделі, в дослідженому діапазоні відрізняються не більше, ніж на 6%. Це дозволяє використати при наближеному інженерному розрахунку кільцевих течій моделі «універсального профілю швидкості» для розрахунку гідродинамічних характеристик плівки, в першу чергу, дотичної напруги та «динамічної швидкості».

Аналіз рис.8 та рис.9 дозволяє зробити висновок, що у всьому дослідженому діапазоні витратних характеристик двофазного потоку існує турбулентний режим течії плівки, що підтверджується розрахунками за моделлю 3.

На рис.10 та рис.11 представлені розрахункові криві локальної тепловіддачі для всього діапазона зміни параметрів двофазного потоку, що мали місце в досліді, побудовані по моделі 3.

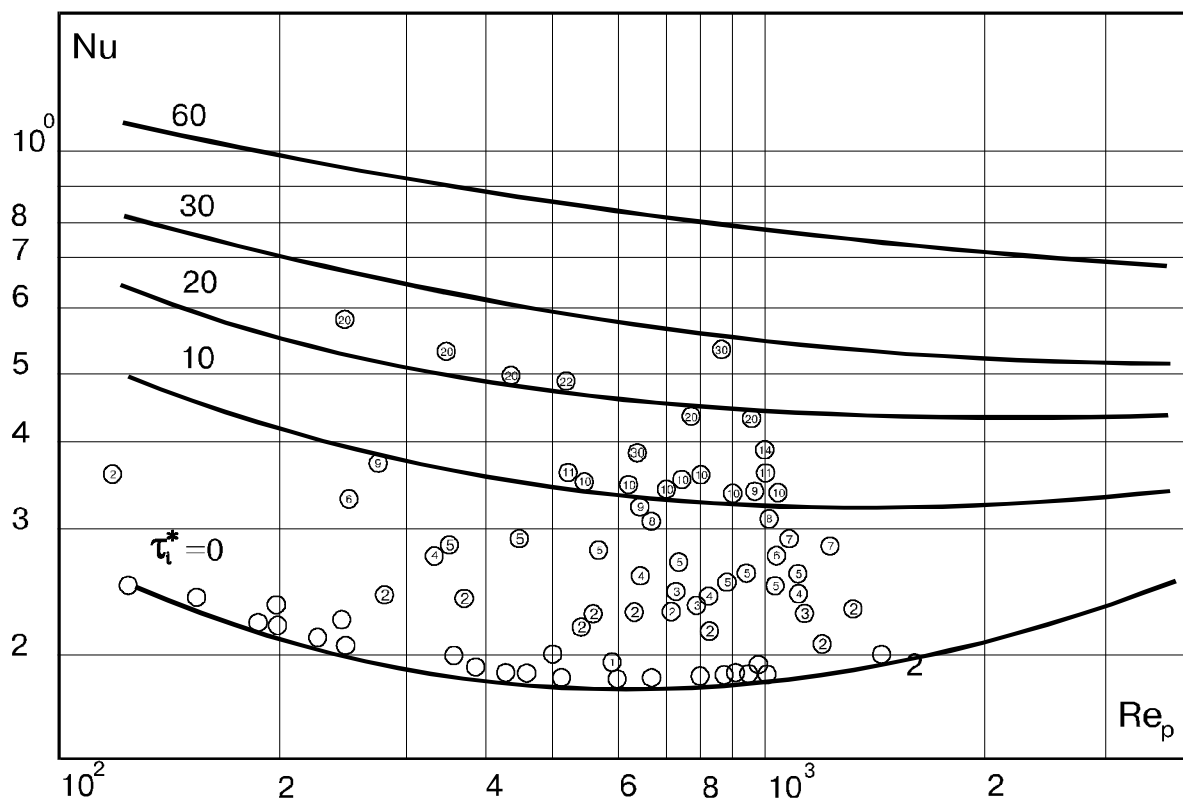


Рис.10. Залежність $Nu=f(Re_p)$ розрахована за моделлю 3. $Pr_p=4$.
 ⑥ - дослідні дані з вказаною дотичною напругою.

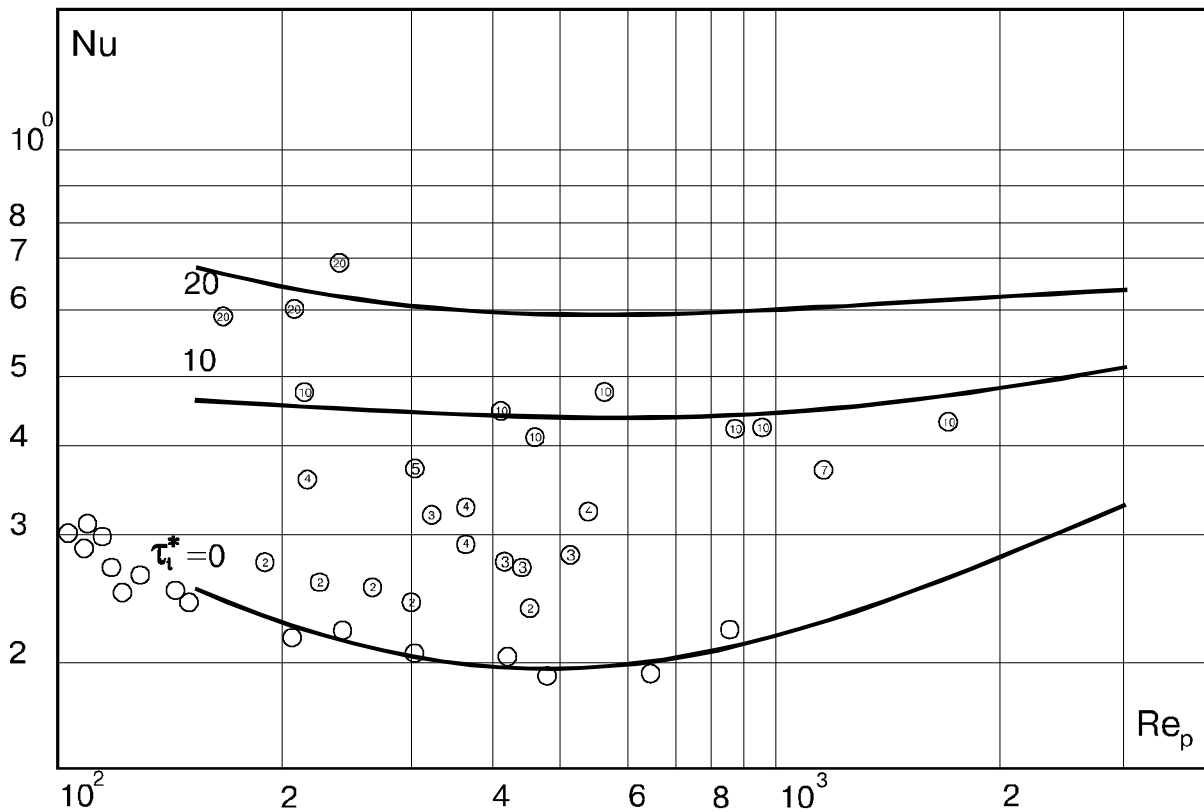


Рис.11. Залежність $Nu=f(Re_p)$ розрахована за моделлю 3. $Pr_p=8$.
 ②-дослідні дані з вказаною дотичною напругою.

В четвертому розділі наведено аналіз результатів дослідження гідродинамічних характеристик двофазної течії з метою створення методики розрахунку міжфазної дотичної напруги та втрат тиску.

Рівняння руху парового ядра спадаючого кільцевого потоку для умов, що досліджуються запишемо у вигляді:

$$\tau_i = -\frac{D}{4} \frac{dP}{dz} - \frac{D}{4} \frac{d}{dz} (\rho_n \omega_n^2) \quad (12).$$

Вплив поперечного потоку маси при випаровуванні на міжфазну дотичну напругу визначили, скориставшись рекомендаціями [3]:

$$\tau_{ia} = \frac{f'_{ia}}{8} \rho_n \omega_n^2 = \tau_i + 0,6 \frac{q}{r} \omega_n \quad (13)$$

де τ_{ia} та f'_{ia} - дотична напруга та коефіцієнт тертя на “адіабатній” стінці, а саме, при відсутності випаровування, що характеризують профільний опір хвильової поверхні плівки.

Як наслідок аналізу, було зроблено висновок про фізичну обґрунтованість використання приведенного коефіцієнту опору для аналізу та розрахунку гравітаційно стікаючих кільцевих течій в діапазоні режимних параметрів, який досліджувався в даній роботі.

В якості визначального параметру, що характеризує вплив на f_{ia} форми поверхні розділу фаз, приймаємо еквівалентну піщану шорсткість поверхні розподілу фаз. При аналізі результатів досліджень хвилеутворення було зроблено висновок про те, що величина k_s визначається як товщиною плівки, так і витратними характеристиками течії. Дана обставина зумовила використання для аналізу отриманих даних систему безрозмірних параметрів для запису рівняння, яке б описувало залежність величини еквівалентної піщаної шорсткості від характеристик течії. Для аналізу системи параметрів течії були використані методи теорії подібності, а саме аналіз розмірностей. В загальному вигляді можна записати:

$$k_s = f(\Gamma_v, v, \sigma, \tau_i, \rho_p, g); \quad (14)$$

Виходячи з π -теореми, число безрозмірних змінних буде дорівнювати чотирьом, тобто кінцеве функціональне рівняння повинне містити чотири π -члени.

В безрозмірному вигляді π -члени набули

$$\Pi_1 = k_s \times \left(\frac{v^2}{g} \right)^{-\frac{1}{3}} = k_s^+ . \quad (15)$$

$$\Pi_2 = \frac{4\Gamma_v}{v_p} = Re_p; \quad (16)$$

$$\Pi_3 = \sigma \times v^{-\frac{4}{3}} \times \rho^{-1} \times g^{-\frac{1}{3}} = Ka; \quad (17)$$

$$\Pi_4 = \tau_i / \left[\rho g \left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \right] = \tau_i^* . \quad (18)$$

Тоді функціональна залежність для визначення величини еквівалентної піщаної шорсткості поверхні плівки придбала вигляду:

$$k_s^+ = f(\text{Re}_p, \tau_i^*, \text{Ka}). \quad (19)$$

Величину еквівалентної піщаної шорсткості визначили, використовуючи формулу Коулбрука-Уайта, яка пов'язує коефіцієнт опору та еквівалентну піщану шорсткість в області з частковим проявом шорсткості :

$$\frac{1}{\sqrt{f'_{ia}}} = 1,74 - 0,87 \ln \left(\frac{2k_s}{D} + \frac{18,6}{\text{Re}_n \sqrt{f'_{ia}}} \right). \quad (20)$$

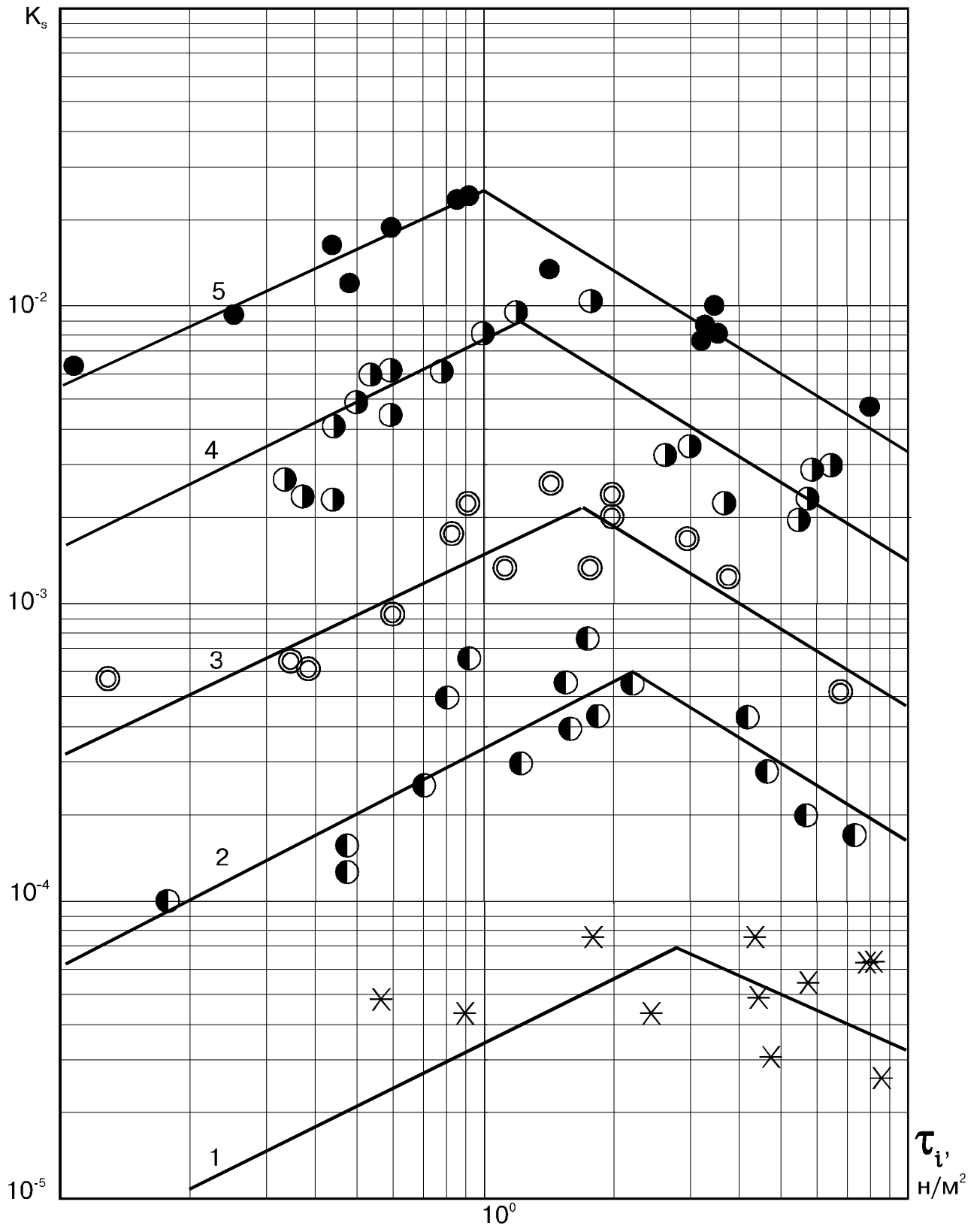


Рис.12. Еквівалентна піщана шорсткість поверхні розподілу пара-рідина.
Розрахунок: 1- $Re_p=300$; 2- $Re_p=500$; 3- $Re_p=700$;
4- $Re_p=1000$; 5- $Re_p=1300$; $Pr_p=4$.

Дослідні дані: $\times$ - $Re_p=250-350$; $\bullet$ - $Re_p=450-550$; $\circ$ - $Re_p=650-750$;
 $\bullet$ - $Re_p=950-1050$; $\bullet$ - $Re_p=1250-1350$; $Pr_p=4$.

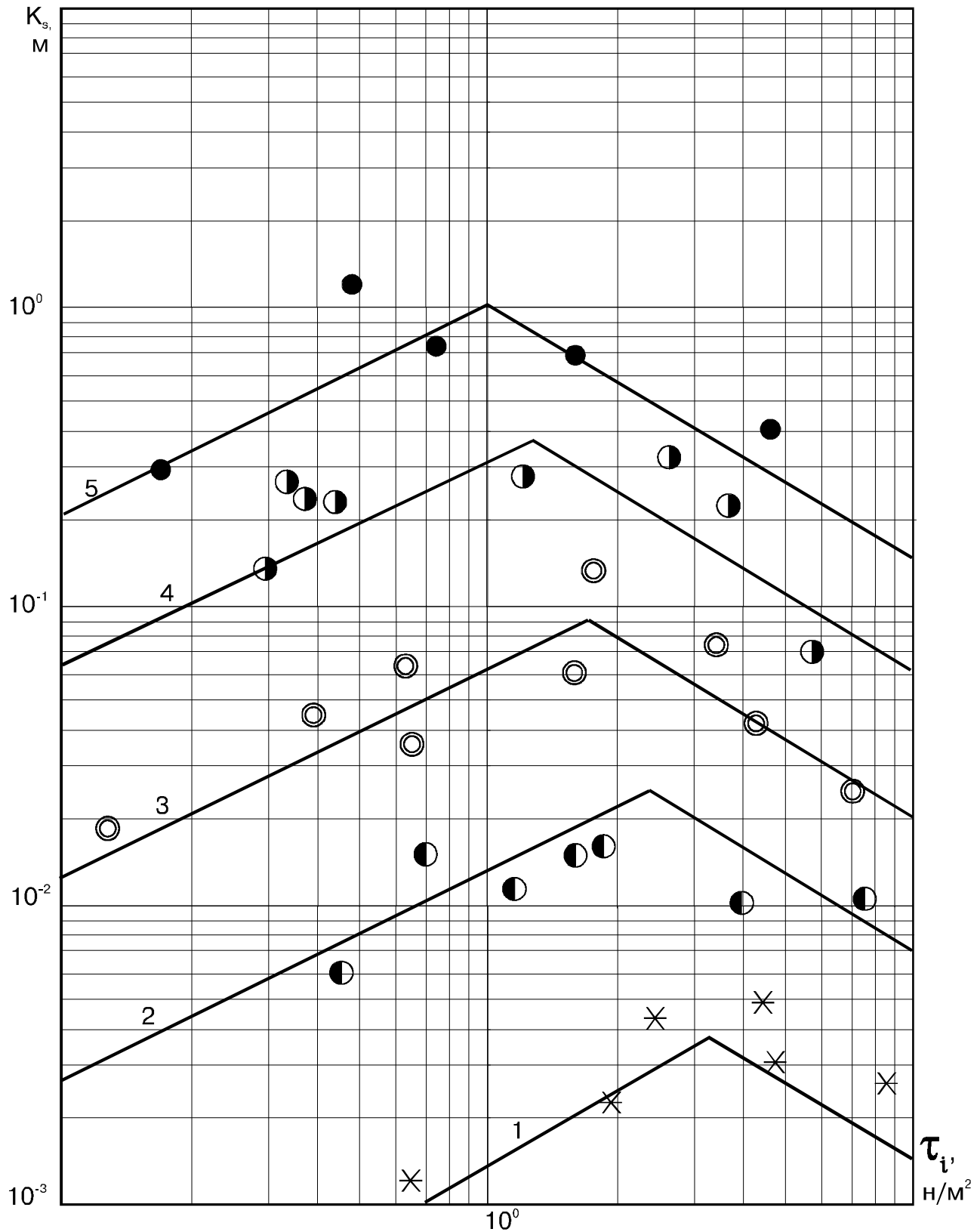


Рис.13. Еквівалентна піщана шорсткість поверхні розподілу пара-рідина.
 Розрахунок: 1- $Re_p=300$; 2 - $Re_p=500$; 3- $Re_p=700$;
 4- $Re_p=1000$; 5- $Re_p=1300$; $Pr=8$.
 Дослідні дані: $\times$ - $Re_p=250-350$; $\bullet$ - $Re_p=450-550$; $\odot$ - $Re_p=650-750$;
 $\ominus$ - $Re_p=950-1050$; $\bullet$ - $Re_p=1250-1350$; $Pr=8$.

В результаті аналізу результатів дослідження гідродинамічних характеристик течії в системі запропонованих параметрів було отримано рівняння для визначення приведеної еквівалентної шорсткості поверхні розподілу «пара-рідина». Причому, виявлено дві області з різним характером впливу τ_i на k_s^+ . В першій області із збільшенням дотичної напруги k_s^+ росте:

$$k_s^+ = 3370 \tau_i^{*0,685} \times Re_p^{4,54} \times Ka^{-1,347} \quad (21) \text{ в другій області навпаки:}$$

$$k_s^+ = 473 \times 10^3 \tau_i^{*-0,87} \times Re_p^{3,16} \times Ka^{-1,0925} \quad (22).$$

Слід відмітити, що якісно характер зміни еквівалентної піщаної шорсткості подібний зміні приведенного коефіцієнту опору в кожній з областей. Однак значною перевагою обраної методики представлення результатів є те, що у вибраній системі змінних ступінь впливу визначальних параметрів на k_s постійна.

Розрахункова межа областей залежить від витрати рідини в плівці, а також її фізичних властивостей та може бути визначена за формулою, отриманою в результаті спільного аналізу (21) та (22):

$$\tau_{\text{неп}}^* = 63 Re_p^{-0,875} \times Ka^{0,1196} \quad (23).$$

На рис.12 та рис.13 наведено порівняння значень еквівалентної піщаної шорсткості розрахованої за (21) та (22), а також обчисленого з використанням дослідних даних даної роботи.

На рис.14 та 15 наведено порівняння отриманих в дослідах та розрахованих по запропонованій методиці значень приведенного коефіцієнта тертя пари. У всьому діапазоні параметрів двофазного потоку результати розрахунків відповідають експериментальним даним.

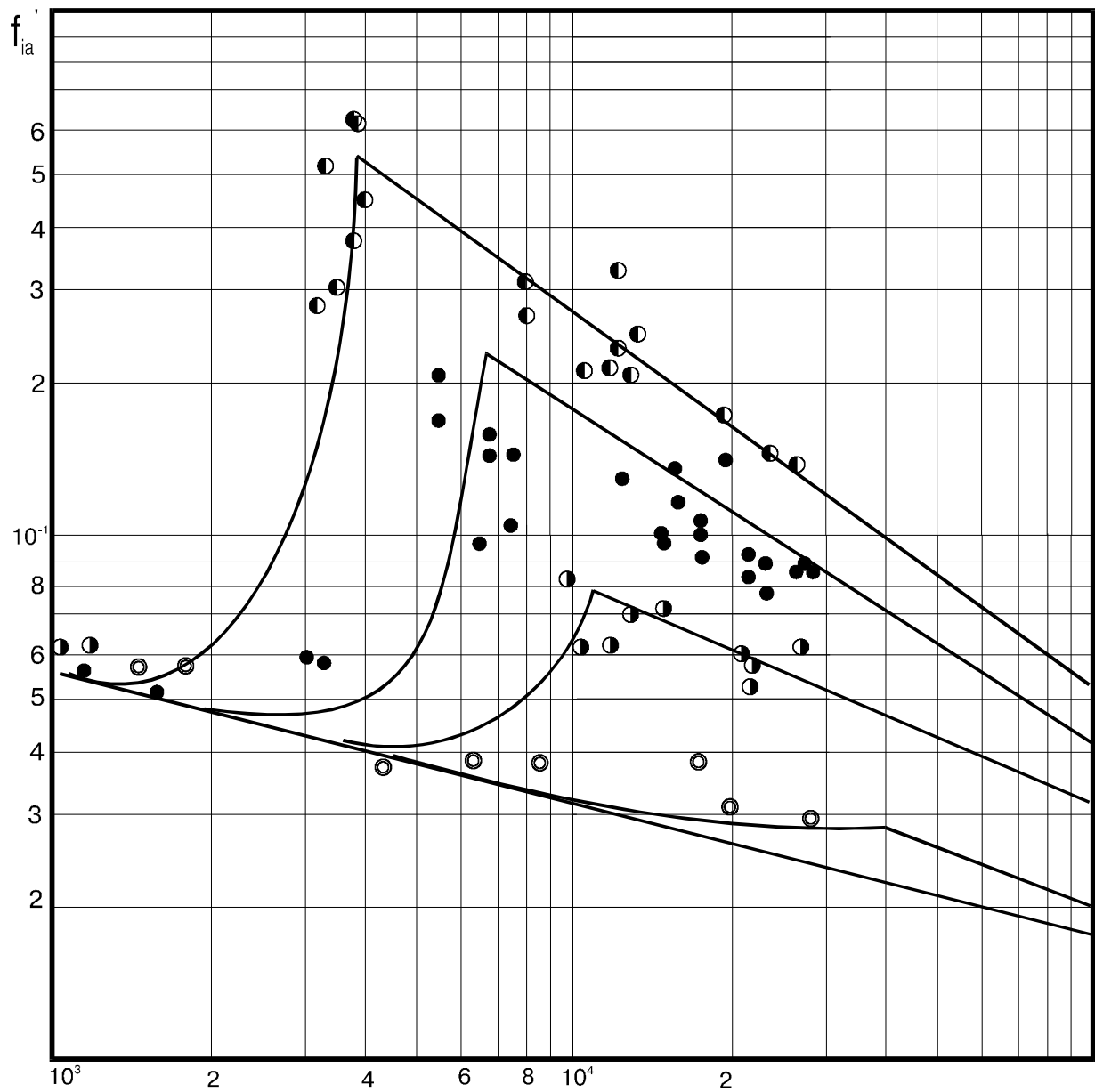


Рис.14. Порівняння розрахункового та отриманого в дослідіх
приведеного коефіцієнта тертя пари.

○- $Re_p=250-350$; ◐- $Re_p=650-750$;
● - $Re_p=950-1050$; ● - $Re_p=1250-1400$. $Pr=4.0$.

1- Розрахунок по залежності Блазіуса.

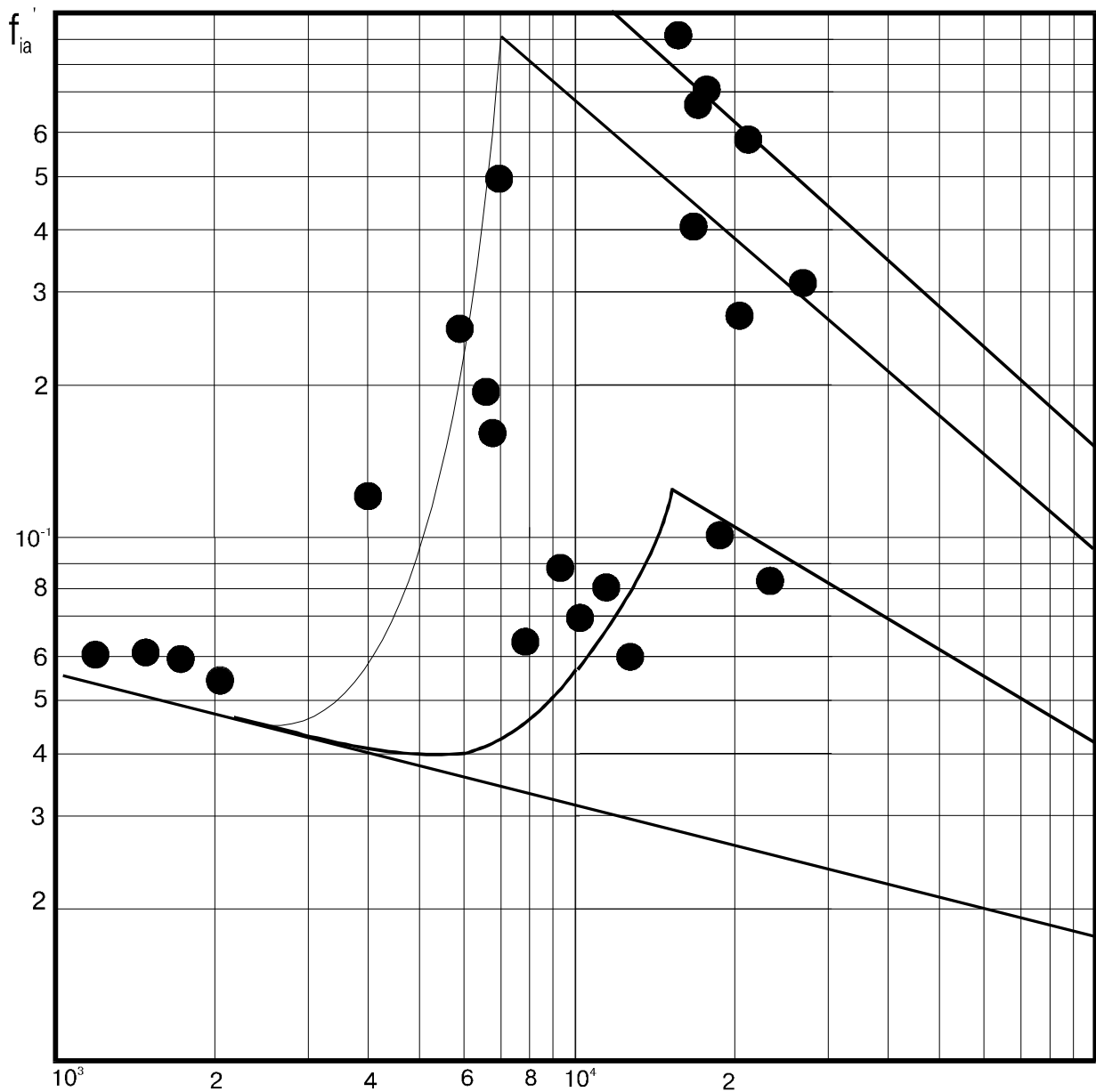


Рис.15. Порівняння розрахункового та отриманого в досліді
приведеного коефіцієнта тертя пари.

- $Re_p=250-350$; - $Re_p=650-750$;

○ - $Re_p=950-1050$; ● - $Re_p=1250-1400$. $Pr=4.0$.

1-● Розрахунок по залежності Блазіуса.

В додатках наведена програма для розрахунку дискретно-локальної тепловіддачі при випаровуванні з поверхні гравітаційно-стікаючої плівки при наявності супутного парового потоку та блок-схема розрахунку плівкового випарного апарата з її описом.

Висновки.

Проведено експериментальне дослідження дискретно-локальних теплогідродинамічних характеристик процесу випаровування з поверхні гравітаційно стікаючих плівок при наявності супутного парового потоку, при аналізі результатів якого:

- встановлено факт турбулізуючої дії на плівку рідини парового потоку та поперечного міжфазного потоку маси у всьому діапазоні витратних характеристик плівки;
- відмічена відсутність інших режимів течії плівки при випаровуванні, крім турбулентного, у всьому діапазоні проведених досліджень;
- підтверджено, що придушення турбулентності в плівці поблизу міжфазної межі при розвинутій турбулентній течії залежить як від фізичних властивостей рідини, так і від величини міжфазної дотичної напруги;
- величина міжфазної дотичної напруги визначається інтенсивністю хвилеутворення на поверхні плівки у всьому діапазоні зміни витратних параметрів двофазного потоку.
- виявлено дві області характерного впливу міжфазної дотичної напруги на величину еквівалентної піщаної шорсткості стікаючої плівки: в одній з ростом дотичної напруги k_s зростає, в іншій - падає;

В роботі запропоновані:

- емпірична розрахункова залежність для визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі при випаровуванні з поверхні гравітаційно стікаючих плівок при наявності супутного потоку пари;
- модель турбулентного переносу енергії та імпульсу в плівці при розвинутій турбулентній течії;
- залежності для визначення величини приведеної еквівалентної шорсткості поверхні розподілу фаз;
- методика визначення дотичної напруги на поверхні розподілу фаз кільцевого потоку, яка враховує залежність між цією дотичною напругою та еквівалентною шорсткістю;
- методика розрахунку плівкових випарних апаратів для концентрування плодівих соків.

Умовні позначення.

L - довжина, лінійний розмір, м; D, R - діаметр та радіус труби відповідно, м;
 y, z -поперечна та повздовжня координата відповідно, м; r - радіус, м; теплота фазового переходу, Дж/кг;
 g - прискорення вільного падіння, м/с²; P - тиск, Па; ΔP - різниця тисків, Па; $\frac{\Delta P}{\Delta z}$ - градієнт тиску, Па/м; T, t -температура, °K, °C; q -густина теплового потоку, Вт/м²; ω - швидкість, м/с; $U^* = \sqrt{\tau/\rho}$ -динамічна швидкість, м/с;
 λ - теплопровідність, Вт/(мK); α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²K); δ - товщина плівки, м; μ - динамічна вязкість, Па×с; ν -кінематична вязкість, м²/с;
 ρ -густина, кг/м³; τ -дотична напруга, н/м²; τ_{ia} -адіабатна дотична напруга, н/м²; c_p - ізобарна теплоємність, Дж/(кгK); a -температуропровідність, м²/с;
 σ - поверхневий натяг, н/м; Γ - густина зрошення, кг/(мс); ν_T - коефіцієнт турбулентного переносу імпульсу (кажущаяся турбулентна кінетична вязкість), м²/с; k_s - еквівалентна піщана шорсткість, м; f - коефіцієнт тертя; $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$ - число Нусельта;
 $St = \frac{\alpha}{\rho_p c_p u^*}$ -число Стентона; $Pr = \frac{\nu_p}{a}$ -число Прандтля; $Re_\delta = \frac{4\Gamma_\nu}{\nu_p}$ -число Рейнольдса; $Ar_{xb} = \frac{\sigma^3 \rho_p^2}{g \mu_p^4 (\rho_p - \rho_n)}$ -хвильове число Архімеда; $Ka = \frac{\sigma^3}{\rho^3 g \nu^4}$ -число Капиці; $y^+ = \frac{yu^*}{\nu_p}$ -відстань; $\omega^+ = \frac{\omega}{u^*}$ -швидкість;
 $\delta^+ = \frac{\delta u^*}{\nu_p}$ - товщина плівки; $\nu_\tau^+ = \frac{\nu_\tau}{\nu}$ -коефіцієнт турбулентної вязкості;
 $k_s^+ = k_s / (\nu^2 / g)^{1/3}$ - еквівалентна шорсткість; $\tau_i^* = \tau_i / [\rho g (\nu^2 / g)^{1/3}]$ -дотична напруга; $T^+ = St^{-1}$ - температура.

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних роботах.

- 1.Форсюк А.В.,Прядко М.О.,Василенко С.М. Результати дослідження теплообміну при концентруванні яблучного соку в гравітаційно-стікаючій плівці.- В кн.:Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчовій промисловості. Тези доповідей Міжнародної науково-техн.конференції, Київ 1993.
- 2.Форсюк А.В., Прядко М.О. Випарна установка для концентрування фруктових та овочевих соків.- В кн.:Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчовій промисловості. Тези доповідей Міжнародної науково-техн.конференції, Київ 1993.
- 3.Форсюк А.В., Прядко М.О.,Василенко С.М.,Сторожук О.Т. Математичне моделювання процесів випарювання з вільної поверхні гравітаційно-стікаючих плівок при наявності супутного газового потоку.- В кн.:Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість. Тези доповідей науково-техн.конференції, Київ 1995.
- 4.Форсюк А.В., Прядко М.О.,Василенко С.М.,Сторожук О.Т. Дослідження впливу спутного газового потоку на процес випарювання в плівці. .- В кн.:Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість. Тези доповідей науково-техн.конференції, Київ 1996.
- 5.Форсюк А.В., Прядко М.О.,Василенко С.М.,Сторожук О.Т. Програмне забезпечення математичного моделювання процесів випаровування гравітаційно стікаючих плівок. .- В кн.:Розробка та впровадження нових технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість. Тези доповідей науково-техн.конференції, Київ 1996.

Література.

1. Mills A.F., Chung D.K. Heat Tansfer Across Turbulent Falling Films.- I.J. Heat Mass Transfer, 1973, v.16, №3, p.p.694÷696.
2. Хаббард, Милз, Чжунь. Теплоотдача к турбулентной стекающей пленке с сопутствующим паровым потоком.- Теплопередача, 1976, №2, с.183÷185.
3. Хабенский В.Б., Боришанский В.М., Грановский В.С., Морозов П.А. Расчет конденсации в горизонтальных трубах при расслоенном течении двухфазного потока.- Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1977, №5, с.150÷159.

Forsyuk, A.V. Heat Exchange By Evaporation From The Surface Of Gravity Flowing-Off Apple Juice Films.

The thesis on competition for a technical science candidate's degree in the speciality 05.14.04 - Industrial Heat Power, the Ukrainian State University of Food Technologies, Kiev 1996.

The thesis contents of which is published in five scientific papers proposes a model of turbulent energy and pulse transfer in a film at developed turbulent flow; proposes an empirical design relationship for determining local convective heat exchange coefficients by evaporation from the surface of the gravity flowing-off films in the presence of interface tangential stress; proposes methods for determining phase boundary tangential stress that consider a relationship between this tangential stress and interface equivalent roughness; proposes relationships for determining interface reduced equivalent roughness value. On the base of the process mathematical model proposed a procedure, an algorithm and a program are worked out that allow in the presence of modern computer support to calculate energy and pulse transfer by evaporation from the film surface in the presence of the concurrent steam flow over a wide range of variation in fruit juice evaporators' operating conditions.

Форсюк А.В. Теплообмен при испарении с поверхности гравитационно стекающих пленок яблочных соков.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности - 05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика, Украинский Государственный университет пищевых технологий, Киев, 1996.

В диссертации, содержание которой опубликовано в пяти научных работах, предложена модель турбулентного переноса энергии и импульса в пленке при развитом турбулентном течении; предложена эмпирическая расчетная зависимость для определения локальных коэффициентов теплоотдачи при испарении с поверхности гравитационно стекающих пленок при наличии касательного напряжения на границе раздела фаз; предложена методика определения касательного напряжения на межфазной границе, которая учитывает зависимость между этим касательным напряжением и эквивалентной шероховатостью поверхности раздела фаз; предложены зависимости для определения величины

приведенной эквивалентной шероховатости поверхности раздела фаз. На основании предложенной математической модели процесса разработана методика, алгоритм и программа, которые позволяют при наличии современного компьютерного обеспечения производить расчет переноса энергии и импульса при испарении с поверхности пленки при наличии спутного парового потока в широких пределах изменения режимных параметров работы испарителей плодовых соков.

Ключові слова.

Теплообмін, турбулентна течія, дотична напруга, коефіцієнт опору, шорсткість, вязкість, міжфазна межа.