

# Міжфазне тертя на поверхні пристінної плівки води та киплячих цукрових розчинів в режимі стікання по вертикальній поверхні

**В.П. Петренко**, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

**М.О. Прядко**, доктор технічних наук, професор кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

**О.М. Рябчук**, асистент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

*Виконано експериментальне дослідження міжфазного тертя в режимі супутнього руху пари та гравітаційно-стікаючої плівки цукрових розчинів при незначному тиску та вакуумі. Наведено зручне узагальнююче рівняння для розрахунку коефіцієнта міжфазного тертя, справедливого як для адиабатних, так і діабатних потоків для труб різних діаметрів при русі як води, так і густих сиропів при незначному тиску та вакуумі.*

*Ключові слова: гідравлічний опір, міжфазне тертя, гравітаційно-стікаюча плівка, цукрові розчини.*

*Выполнено экспериментальные исследования межфазного трения в режиме сопутствующего движения пара и гравитационно-стекающей пленки сахарных растворов при незначительном давлении и вакууме. Приведено удобное обобщающее уравнение для расчета коэффициента межфазного трения, справедливого как для адиабатных, так и диабатных потоков для труб разных диаметров при движении как воды, так и густых сиропов при незначительном давлении и вакууме.*

*Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, межфазное трение, гравитационно-стекающая пленка, сахарные растворы.*

*Experimental study of interfacial friction in the mode of concomitant movement of vapour and gravity-flowing film of sugar solutions with slight pressure and vacuum is executed. Convenient generalizing equation for calculating the coefficient of interfacial friction, just as for the adiabatic and diabatic flow for various pipes diameters at the motion of both water and thick syrups slight pressure and vacuum are presented.*

*Keywords: hydraulic resistance, interfacial friction, gravitationally falling film, sugar solutions.*

Відомо, що паровий, або газовий потік інтенсивно взаємодіє з пристінною гравітаційно-стікаючою плівкою рідини. При цьому, в залежності від співвідношення фаз проявляються три характерні режими взаємодії пристінної плівки з газовим потоком – режим слабкої взаємодії за незначних швидкостях пари, перехідного – зі стрімким ростом гідравлічного опору, та режиму сильної взаємодії – стабільним рухом при підвищеному гідравлічному опорі.

При малих витратах газової фази спостерігається незначний вплив газового потоку на характер течії плівки та хвилювання на її поверхні.

Зі зростанням швидкості газу структура хвиль змінюється - виникають хвилі збурення, при цьому має місце стрімке зростання коефіцієнта міжфазного тертя. Зазначений режим є перехідним.

З подальшим зростанням швидкості газу в міру збільшення дотичної напруги відбуваєть-

ся зрив рідини з вершин гребенів хвиль з відповідним уповільненням темпу зростання дотичної напруги, а коефіцієнт гідравлічного тертя, досягнувши максимуму, починає рівномірно падати. Останній режим має назву - дисперсно-кільцевий.

Зазначені структурні перетворення зафіксовано практично всіма дослідниками, що здійснювали експериментальні дослідження гідродинамічних параметрів плівкових течій на вертикальних трубах різних діаметрів та довжин з вдуванням повітря [1, 2, 3, 4, 5]. Аналогічний характер залежності міжфазного гідравлічного опору було зафіксовано і для паро-рідинних потоків [6].

В плівкових випарних апаратах, експлуатація яких здійснюється при незначному тиску та вакуумі, тертя парового потоку відбувається об поверхню розчинів різної концентрації, в'язкість яких перевищує в'язкість води в 30–100 разів особливо під вакуумом. Тому закономірності міжфаз-

## ТЕХНІКА &amp; ТЕХНОЛОГІЇ

ного тертя – важливої характеристики для аналізу плівкових процесів – можуть дещо відрізнитись від адиабатних повітря-водяних потоків.

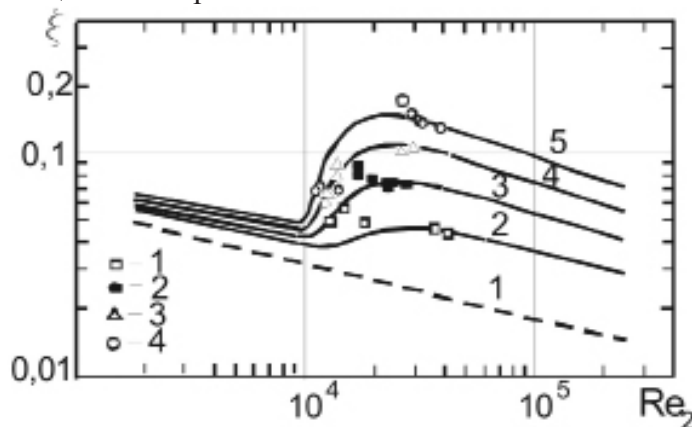
Для з'ясування питань опору паровому потоку в середовищі стікаючих густих розчинів та води виконано експериментальні дослідження на стенді, дослідна ділянка якого складала 1,8 м з труби із нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 20 мм з незалежним формуванням витрат фаз. Модельними рідинами виступали вода та цукрові розчини з концентрацією до 72%.

Досліджений діапазон режимних та витратних параметрів: об'ємна щільність зрошення -  $0,04 \dots 0,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ ; вакуум -  $0 \dots 0,8$  бар; приведена до перерізу труби швидкість пари -  $8 \dots 45 \text{ м/с}$ .

Отримані дані підтвердили традиційний характер взаємодії пристінної плівки з паровим ядром потоку з трьома характерними режимами. Залежність коефіцієнта міжфазного тертя в залежності від витратних характеристик парового ядра для нагрітої до температури насичення води та цукрового сиропу з концентрацією 70% зображена на **рис.1, 2**, відповідно.

З наведених графіків видно, що чим вища щільність зрошення, тим за меншої швидкості газу здійснюється перехід до режиму сильної взаємодії і тим крутіше перехідна крива.

Коефіцієнт міжфазного тертя пари об плівку концентрованого сиропу, **рис.2** систематично більше ніж для паро-водяного потоку, що пояснюється суттєвим зростанням товщини плівки за тієї ж щільності зрошення.



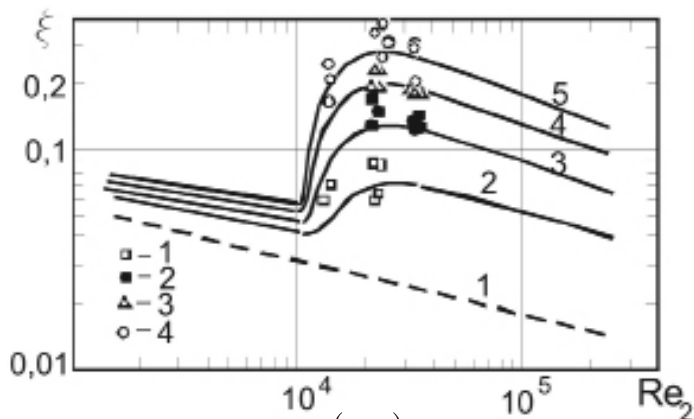
**Рис.1.** Залежність  $\xi = f(Re_2)$  для паро-водяного потоку при  $d = 0,02 \text{ м}$ ;  $L = 1,8 \text{ м}$ .

$$1 - \Gamma_v = 0,05 \cdot 10^{-3} \frac{\text{М}^2}{\text{с}}; 2 - 0,15 \cdot 10^{-3};$$

$$3 - 0,3 \cdot 10^{-3}; 4 - 0,5 \cdot 10^{-3}.$$

Лінії відповідають розрахунку за співвідношенням(1)завитрат:  $2 - \Gamma_v = 0,05 \cdot 10^{-3} \frac{\text{М}^2}{\text{с}}$ ;  $3 - 0,15 \cdot 10^{-3}$ ;  $4 - 0,3 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 - 0,5 \cdot 10^{-3}$ . Лінія 1 відповідає руху на суху стінку.

Узагальнення даних виконують, як правило, або у формі степеневих рівнянь для кожної зони [1-5], або у формі коефіцієнта опору Колбрука-Уайта через еквівалентну шорсткість пристінної плівки, що було запропоновано для паро-рідинних потоків [6].



**Рис.2.** Залежність  $\xi = f(Re_2)$  для паро-сиропного потоку з концентрацією 70% при  $d = 0,02 \text{ м}$ ;  $L = 1,8 \text{ м}$ .

$$1 - \Gamma_v = 0,05 \cdot 10^{-3} \frac{\text{М}^2}{\text{с}}; 2 - 0,15 \cdot 10^{-3}; 3 - 0,3 \cdot 10^{-3}; 4 - 0,5 \cdot 10^{-3}.$$

Лінії відповідають розрахунку за співвідношенням(1)завитрат:  $2 - \Gamma_v = 0,05 \cdot 10^{-3} \frac{\text{М}^2}{\text{с}}$ ;  $3 - 0,15 \cdot 10^{-3}$ ;  $4 - 0,3 \cdot 10^{-3}$ ;  $5 - 0,5 \cdot 10^{-3}$ . Лінія 1 відповідає руху на суху стінку.

Рівняння першого типу [3-5] узагальнюють лише дані для конкретної серії експериментальних даних для певного діаметра каналу, а границі дії рівнянь визначаються абсцисою на перетині ліній розрахункових співвідношень, що обмежує їх універсальність. Рівняння другого типу [6] основані на адекватній фізичній моделі процесу, тому якісно відображають як характер зміни коефіцієнта гідравлічного опору при зміні швидкості газу, так і умови переходу від другого до третього режимів взаємодії. Але взаємозалежність коефіцієнтів опору в формі Колбрука-Уайта вимагає ітерації. Крім того, в [6] еквівалентна пісочна шорсткість виражається через дотичну напругу на міжфазній поверхні, яку знаходять через коефіцієнт гідравлічного тертя, а це призводить до подвійної ітерації.

Нарешті, співставлення експериментальних даних для газорідинних та паро-рідинних потоків вказує на суттєвий вплив діаметра труби як на коефіцієнт гідравлічного міжфазного тертя, так і на межі переходу від однієї структурної форми до іншої. Крім того, отримані на газоводяних потоках дані не враховують впливу в'язкості, яка суттєво змінюється в паро-рідинних потоках в парогенеруючих каналах з концентруванням розчинів, **рис. 2**.

Аналіз результатів міжфазного тертя в паро-водяних та паро-сиропних потоках при незначному тиску та вакуумі в трубі діаметром 20 мм, а також інших авторів [1, 2, 3, 4, 5] для повітряно-водяних потоків в трубах діаметрами відповідно 13, 34, 50 мм дозволив отримати універсальне рівняння для визначення коефіцієнта міжфазного тертя  $\xi$  у формі:

$$\xi = \xi_1 + \frac{627 \left( \frac{d_o}{d} \right)}{Fr_2^{1,26} \left\{ \exp \left[ \frac{1}{\left( Fr_2 - H^{1,1} \sqrt{\frac{d}{d_o}} \right) \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} K_8^{1,5}} \right] - 1 \right\}} \quad (1)$$

$\frac{d}{L}$	Режим руху	Розрахункове рівняння	Джерело
$\frac{25}{2000}$	2	$\xi = 0,18 \cdot 10^{-9} Re_2^{1,35} Re^{0,93}$	[4]
	3	$\xi = 0,893 Re_2^{-0,492} Re^{0,49}$	
$\frac{50}{3200}$	2	$\xi = 0,68 \cdot 10^{-7} Re_2^{0,582} Re^{0,705}$	[5]
	3	$\xi = 0,3 Re_2^{-0,468} Re^{0,517}$	
$\frac{34}{2600}$	1	$\xi = \xi_c \left[ 1 + 0,75 Re_2^{-0,51} \left( \frac{g \delta}{v} \right)^{0,505} \left( \frac{\sigma}{\rho_2 g \delta^2} \right)^{0,08} \right]$	[3]
	3	$\xi = \xi_c \left[ 1 + 956 Ga^{-0,705} We^{-0,32} \left( \frac{Re}{4} \right)^{0,75} \left[ 1 + 533 \left( \frac{L}{d} \right)^{-2,5} \right] \right]$	
$\frac{28}{3000}$	2 - 3	$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = 1,74 - 0,87 \ln \left( \frac{2\Delta_{ек}^*}{d} + \frac{18,6}{Re_2 \sqrt{\xi}} \right)$  $\Delta_{ек}^* = 7 \cdot 10^3 \frac{\tau_i^*}{\tau_i^{*2,8} + 15} Re^4 We_*^{-3,8}$	[6]

Де  $\xi_1 = \xi_c + 3 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-2} K_\delta$  - коефіцієнт гідравлічного тертя для першої зони - режиму слабкої взаємодії;  $\xi_c = \frac{0,316}{Re_2^{0,25}}$  - коефіцієнт гідравлічного тертя на суху стінку.

Перехід до перехідної другої зони здійснюється за умови:  $Fr_2 - H^{1,1} \sqrt{\frac{d}{d_o}} \geq 0$ .

У формулі (1):  $K_\delta = \sqrt[6]{\frac{\Gamma_v^3 v}{g^2} \sqrt{\frac{g \rho}{\sigma}}}$ ;  $H = \sqrt{\frac{\rho \sigma}{g d^2 \rho_2^2}}$ ;  
 $Fr_2 = \frac{u_2^2}{g d}$ ;  $Re_2 = \frac{u_2 d \rho_2}{\mu_2}$ ;  $d_o = 0,013$  м;

$\Gamma_v$  - об'ємна щільність зрошення, м<sup>2</sup>/с;  $\rho, v, \sigma$  - густина, кінематична в'язкість та поверхневий натяг рідини, відповідно;  $\rho_2, \mu_2$  - густина та в'язкість пари (газу);  $u_2$  - приведена до перерізу труби швидкість пари;  $d$  - діаметр труби. У формулах [3-6]:

$We = \frac{u_2^2 \rho d}{\sigma}$ ;  $We_* = \frac{\sigma}{\rho \left( \frac{v^2}{g} \right)^{2/3}}$ ;  $Re = \frac{4 \Gamma_v}{v}$ ;

$Ga = \frac{\sigma^{3/2}}{\rho^{3/2} g^{1/2} v^2}$ ;  $\delta$  - товщина плівки;  $L$  - довжи на труби;  $\tau_i^* = \frac{\tau_i}{\rho g \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3}}$  - безрозмірна дотична

напруга на міжфазній поверхні;  $\tau_i = \frac{\xi}{8} \rho_2 u_2^2$  - дотична напруга на міжфазній поверхні.

На рис. 3 надано порівняння розрахункових значень коефіцієнтів міжфазного тертя, розрахованих

за співвідношенням (1), з експериментальними даними [1, 2, 3, 5].

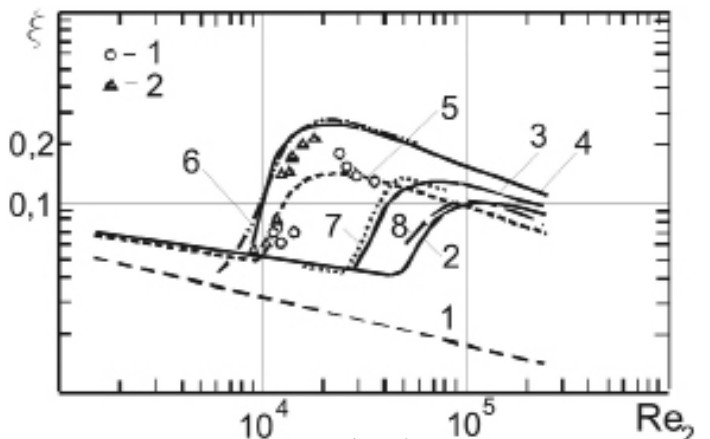


Рис.3. Залежність  $\xi = f(Re_2)$  при  $\Gamma_v = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ .

1 – дані авторів,  $d = 0,02$ ,  $L = 1,8$ , пара – вода,  $t = 100$  °С; 2 – дані [2],  $\Gamma_v = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $d = 0,013$ ,  $L = 0,88$ , повітря – вода,  $t = 20$  °С.

Лінія 1 відповідає гідравлічному опору на суху стінку. Лінії 2, 3, 4 відповідають розрахунку за формулою (1) для повітря-водяного потоку для труб діаметрами відповідно 50, 34, 13 мм. Лінія 5 відповідає розрахунку за формулою (1) для пароводяного потоку для труби діаметром 20 мм. Лінії 6, 7, 8 відповідають узагальненим даним [1, 3, 5] для повітря-водяного потоку для труб діаметрами відповідно 13, 34, 50 мм.

Як видно з наведених графіків, отримане співвідношення (1) задовільно узагальнює як адиабатні, так і діабатні потоки для труб різних діаметрів

## ТЕХНІКА & ТЕХНОЛОГІЇ

при русі як води, так і густих сиропів при незначному тиску та вакуумі. Рівняння (1) не потребує ітерації при розрахунках коефіцієнта міжфазного тертя, містить лише витратні характеристики, тому зручне при розрахунках дотичної напруги на міжфазній поверхні гравітаційно-стікаючих плівок при супутньому русі з парою, або газом.

### Список використаних джерел:

1. Диденко А. Исследование сопротивления и пристеночной области газожидкостного изотермического потока при дисперсно-кольцевом режиме течения [Текст] / А. Диденко, Г. Домбровский, В. Леонов – В кн.: Вопросы теплофизики ядерных реакторов, Вып.3. – М.: Атомиздат, 1971. – С. 23 – 31.
2. Живайкин Л. Я. К вопросу о методике расчета гидравлического сопротивления пленочных аппаратов [Текст] / Л.Я. Живайкин // Теоретические основы химической технологии. – 1969. – том. 3, №1. – С. 145 – 147.
3. Ганчев Б. Г. Экспериментальные исследования процессов гидродинамики и теплопере-

носа при опускном движении двухфазного потока в кольцевом и дисперсно-кольцевом режимах [Текст] / Б.Г. Ганчев, А.Б. Мусвик // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т. 31, № 1. – С. 13-20.

4. Максимов В.В. Исследование гидродинамики нисходящего кольцевого течения газа и пленки жидкости [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. / В.В. Максимов. – М., 1980. – 156 с.

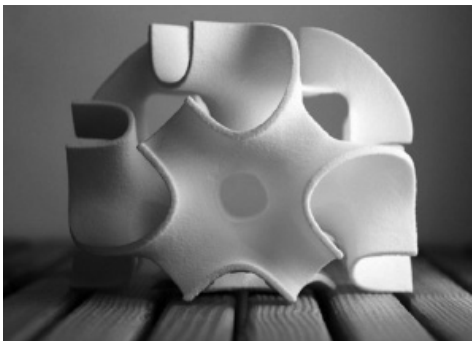
5. Чен Ше-Фу. Потери напора и толщина жидкости пленки при кольцевом двухфазном чисто пленочном течении с образованием эмульсии [Текст] / Ше-фу Чен, Ибеле // Тр. Амер. об-ва инж.- мех. – Теплопередача сер. С. – 1964. – № 1. – С. 116-125.

6. Василенко С. М. Теплообмін в паровидинних течіях теплообмінних апаратів харчових виробництв [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук. / С.М. Василенко. - К., 2003. – 37 с.

*Рецензент: С.М. Василенко,  
д.т.н., проф.*

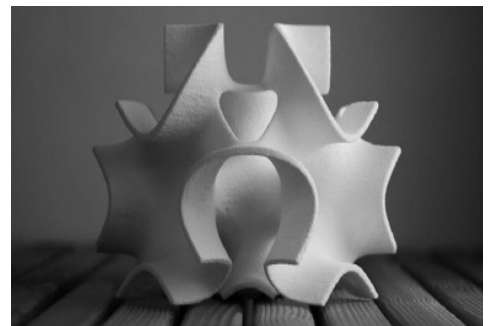
## ЦІКАВІ НОВИНИ

### Геометричні скульптури з цукру



*Інноваційний метод 3D-принтера дозволяє створювати фантастичні скульптури з цукру.*

Популярний сьогодні метод 3D-принтера дійшов навіть до гастрономії. Спеціальні 3D-лабораторії навчилися створювати унікальні інноваційні скульптури з цукру, якими можна не лише милуватися, але й їсти. Тільки



уявіть, що скоро замість звичайного рафінованого цукру кубиками, ми зможемо купувати в супермаркетах цукор у вигляді мініатюрних геометричних скульптур. Правда, такий цукор дуже шкода буде розчиняти в чаї або каві, аж надто він гарний та унікальний.



Варто лише подивитися на ці скульптури і просто приголомшує, до чого дійшли сучасні технології. Буквально за декілька хвилин роботи 3D-принтера звичайний цукор перетворюється на солодкі шедевральні об'єкти.

Завдяки інноваційним технологіям з'явилась можливість творити та створювати просто фантастичні речі. Сьогодні можна створити будь-яку форму та структуру з цукру і це не займає багато часу.

Сімейне підприємство «Sugar Lab» було створене подружжям в Каліфорнії. Пара відкрила для себе і багатьох своїх клієнтів абсолютно новий спосіб створення химерного цукру, а також святкових тістечок і тортів. Компанія швидко стала користуватися великою популярністю. У новоспечених підприємців просто немає відбою від клієнтів.

*Джерело: infuture.ru*