

**Озолина Софія Олександрівна**, канд. хім. наук, доц., кафедра харчової хімії та експертизи, Одеська національна академія харчових технологій. Адреса: вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039. Тел.: 0950528952; e-mail: os.sof.al@gmail.com.

**Озолина Софія Александровна**, канд. хим. наук, доц., кафедра пищевой химии и экспертизы, Одесская национальная академия пищевых технологий. Адрес: ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039. Тел.: 0950528952; e-mail: os.sof.al@gmail.com.

**Ozolina Sofia**, PhD in Chemical Science, Assoc. Prof. Department of Food Chemistry and Expertise, Odessa National Academy of Food Technologies. Address: Kanatna str., 112, Odessa, Ukraine, 65039. Tel.: 0950528952; e-mail: os.sof.al@gmail.com.

**Битка Тетяна Вікторівна**, асп., кафедра харчової хімії та експертизи, Одеська національна академія харчових технологій. Адреса: вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039. Тел.: 0965887718; e-mail: bytka.tatiana@gmail.com.

**Бытка Татьяна Викторовна**, асп., кафедра пищевой химии и экспертизы, Одесская национальная академия пищевых технологий. Адрес: ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039. Тел.: 0965887718; e-mail: bytka.tatiana@gmail.com.

**Bytka Tatiana**, Postgraduate student, Department of Food Chemistry and Expertise, Odessa National Academy of Food Technologies. Address: Kanatna str., 112, Odessa, Ukraine, 65039. Tel.: 0965887718; e-mail: bytka.tatiana@gmail.com.

DOI: 10.5281/zenodo.3592843

УДК 643.336547.128

## АСПЕКТИ ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ОПОРІВ СТЕПЕНЕВИХ РІДИН

**Е.В. Білецький, О.В. Петренко**

*Проаналізовано природу гідравлічних опорів течії ступеневі рідини в трубі та каналі за умов звуження, розширення, повороту. Запропоновано вирази для визначення коефіцієнтів місцевих опорів у вигляді єдиних формул у широкому діапазоні зміни числа Рейнольдса в потоці.*

**Ключові слова:** рідина, ньютонівська, ступенева, течія, гідравліка, місцеві опори, тертя, число Рейнольдса.

## АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТЕПЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Э.В. Белецкий, Е.В. Петренко

*Проанализирована природа гидравлических сопротивлений течения степенной жидкости в трубе и канале при сужении, расширении, повороте. Предложены выражения для определения коэффициентов местных сопротивлений в виде единых формул в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса в потоке.*

**Ключевые слова:** жидкость, ньютоновская, степенная, течение, гидравлика, местные сопротивления, трение, число Рейнольдса.

## ASPECTS OF DETERMINATION OF HYDRAULIC RESISTANCE OF POWER FLUIDS

E. Biletsky, O. Petrenko

*Flows of power fluids, the construction of expressions for determining local resistance in the stepped channel or tube and in rotation on the base of similar values of hydraulic resistance under the flow of Newtonian fluid are considered in the research paper. The basis of the modelling is the use of the principle of Newtonian fluids hydraulic analogy.*

*The values of local resistances for constrictions and extensions under Newtonian fluid flow are well known, therefore, the authors sought to identify the main trends in the dependence of the local resistance coefficients on the Reynolds number under the circulation of power fluids as heat carrier in pipes, channels of heat-generating devices.*

*During carrying out of the work it is shown that the fraction of specific kinetic energy is spent on the local resistance overcoming. This fraction can be represented as the sum of the energy fraction which is associated with the acceleration of the flow, if the constriction exists, or with the inhibition of the flow, if the expansion exists, and turn of the flow at certain angle.*

*The rotational length is proportional to the Reynolds number and the diameter of the pipe for laminar flow. However, this length is the length of the stabilization and includes both the rotation of the flow line and the acceleration (deceleration) of the flow on the straight line which is located behind the local resistance.*

*The flow of Newtonian fluid during rotation is determined by the action of centrifugal force, which causes secondary eddy flows and fluid rotation in the channel. The flow in rotary can be presented as a flow with constrictions and extensions for the main flow, which separates from it secondary flows.*

*However, the size and location of the secondary flows, depending on the Reynolds number, are not known enough. Therefore, another way should be followed on the base of expressions for determining the local resistance and the friction resistance under Newtonian fluid flow. The friction resistance can be neglected for bends with small radius of curvature, since the full resistance is practically equal to the local one.*

*The obtained in the research paper equations can be used in the calculation of hydraulic pressure losses under the power fluid flow as heat carrier in pipelines and shells of technological apparatuses of chemical and food industries.*

**Keywords:** *fluid, Newtonian, power, flow, hydraulic, resistance, friction, local, Reynolds number.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Велика кількість технологічних процесів харчової та хімічної технологій нерозривно пов'язані з тепловими процесами. Під час організації теплових процесів одне з основних питань, яке доводиться вирішувати, – це вибір теплоносія. Для більшості процесів теплообміну цей вибір робиться на користь водяної пари. На такий вибір впливає велика питома теплота пароутворення (конденсації) води. Однак такому вибору притаманні і негативні моменти. Вони полягають у тому, що для використання пари необхідна велика кількість різного обладнання, а також той факт, що тиск водяної пари дуже швидко збільшується зі зростанням її температури, тому використання водяної пари за температур, що перевищують 150 °C стає досить дорогою операцією. На сьогодні використанню водяної пари є альтернатива у вигляді високотемпературних теплоносіїв, до яких належить і велика родина кремнійорганічних рідин. Такі рідини мають властивість кипіти в широкому діапазоні температур, в тому числі й вище 100 °C. Усі кремнійорганічні рідини є степеневими, тобто такими, в'язкість яких залежить від швидкості зрушення за степеневим законом [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом увагу науковців-дослідників привертає можливість використання кремнійорганічних рідин (силіконових мастил) як теплоносіїв. У монографії [2] достатньо повно наведені теплофізичні властивості цих рідин, які дозволяють проводити інженерні розрахунки. Успішні спроби використання кремнійорганічних рідин як теплоносіїв описані в літературі [3–5]. У працях зазначено, що вказані рідини відповідають цілому комплексу вимог до їх термодинамічних, фізико-хімічних, біологічних і технологічних властивостей [1; 2; 6].

Характерною особливістю кремнійорганічних рідин є зв'язок значення в'язкості з їх молекулярною масою таким чином, що низькомолекулярні представники мають в'язкість, близьку до в'язкості води, а високомолекулярні – дуже велику в'язкість [1; 2; 6]. Властивості кремнійорганічних рідин такі, що низькомолекулярні представники мають низькі значення температур спалаху в інтервалі самозаймання парів [1; 2; 6]. Вищенаведені особливості змушують обирати як теплоносії такі кремнійорганічні рідини, у яких зазначені температури

не перевищують 200 °С, мають молекулярну масу близько  $10^3$  та в'язкість, яка в 10–100 разів перевищує в'язкість води [1; 2; 6].

Наведені властивості й отримані результати попередніх досліджень про застосування кремнійорганічних рідин як теплоносіїв дозволяють зробити певні висновки. Інтенсивність теплообміну суттєво залежить від руху теплоносія, що визначається гідравлічним опором трубопроводів і каналів теплообмінних пристроїв. У разі циркуляції кремнійорганічних рідин як теплоносія рух у трубах і каналах теплогенерувальних пристроїв буде переважно ламінарним, на відміну від води або пари, рух яких є турбулентним. При цьому температурні примежові шари будуть значно тонші, ніж гідродинамічні, але мале значення температурного примежевого шару не зможе цілком компенсувати зменшення числа Рейнольдса, яке пов'язане з ламінарним характером теплообміну. Крім того, унаслідок достатньо високої в'язкості зростає навантаження на гідравлічні прилади, тому необхідно вміти проводити інженерні розрахунки гідравлічних опорів для течії рідин високої в'язкості в каналах різної геометрії.

На сьогодні проблема полягає в тому, що про місцеві опори степеневих рідин відомо значно менше, ніж про ньютонівські. Відомо, що течії будь-яких рідин можна поділити на дві групи: сталі та несталі. Різницю між ними легко побачити на прикладі течій ньютонівської рідини в круглій трубі. Сталі течії в круглій трубі можуть бути ламінарними й турбулентними.

Ламінарна стала течія – це течія Пуазейля з параболічним профілем. Турбулентна стала течія – це течія з логарифмічним профілем. Обидва профілі утворюються з довільних початкових або вхідних профілів після того, як рідина проходить певний шлях у трубі. Довжина цього шляху називається довжиною стабілізації або встановлення. Місцеві опори можна вважати незалежними та складати їхні величини за рівнянням Бернуллі тільки в тому випадку, якщо відстань між ними перевищує довжину стабілізації. Визначення довжини стабілізації та величин місцевих опорів є важливим завданням гідравлічного опису руху рідин. Для ньютонівських рідин це відомі розрахункові формули [7]. Стосовно степеневих рідин на сьогодні є досить обмежена кількість досліджень. Дослідження з визначення гідравлічних опорів степеневих рідин можна значно скоротити, якщо взяти до відома, що все різноманіття місцевих опорів може бути зведене до меншого (невеликого) числа основних, з яких (або з течії яких) можна скласти інші місцеві опори (течія в них). До цих основних варто віднести місцеві опори при раптовому розширенні або звуженні каналу, поворот каналу без зміни його поперечного

перерізу й, можливо, деякі інші місцеві опори. Під час течії через звуження та розширення середня швидкість змінюється тільки за величиною, але не за напрямком. У разі протікання через поворот, навпаки, величина середньої швидкості не змінюється, а змінюється тільки напрямком. Вищенаведене є справедливим і для течії будь-якої неньютонівської рідини, зокрема за степеневим законом.

Для аналізу течій у звуженнях, розширеннях і поворотах для степеневих рідин варто проаналізувати течії ньютонівської рідини в ламінарному режимі та на початку турбулентного з урахуванням нелінійного характеру степеневі рідини. Для цього треба проаналізувати залежності місцевих опорів і опорів тертя від числа Рейнольдса стосовно до ньютонівської рідини й потім замінити число Рейнольдса на число Рейнольдса степеневі рідини. Ця процедура досить докладно описана в літературі [8]. Її обґрунтування базується на положенні про те, що для рідини з будь-яким реологічним рівнянням стану можна ввести число Рейнольдса, що є числовою мірою відношення сил інерції та тертя. У такий спосіб для побудови гідравліки степеневі рідини варто вміти обчислювати довжину релаксації та місцеві опори під час проходження звужень, розширень і поворотів.

**Мета статті** – побудова виразів для місцевих опорів у ступеневому каналі або трубі й у повороті на основі аналогічних опорів ньютонівської рідини.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Величини місцевих опорів для звужень і розширень за умов течії ньютонівської рідини є добре відомими й мають такий вигляд [7; 9]:

$$\zeta = 0,5 \left( 1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{3/4} \text{ – звуження,}$$

$$\zeta = \left( 1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^2 \text{ – розширення,} \quad (1)$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт місцевого опору;  $F_0, F_1$  – площі поперечних перерізів вузької та широкої частин, відповідно, м<sup>2</sup>.

Вирази (1) дійсні для ньютонівської рідини, числа Рейнольдса течії якої перевищують величину порядку  $3 \cdot 10^3$ . Ці вирази мають асимптотичний характер за числом Рейнольдса. Залежність для величини  $\zeta$  в інтервалі від нуля до  $3 \cdot 10^3$  має складний характер і являє

собою родину не зовсім монотонно зменшуваних функцій, що залежать від відношення  $F_0 / F_1$  [7; 9].

Аналіз даних не ставить за мету повторити результати, наведені в праці [10], а має іншу мету – виявити основні тенденції залежності від числа  $Re$ , що приводить до таких виразів для коефіцієнта  $\zeta_m$  у всьому діапазоні зміни числа  $Re$ :

$$\zeta = 0,5 \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{\frac{3}{4}} + \frac{15}{\sqrt{Re}} \cdot \left[1 - \varphi \left(Re, \frac{F_0}{F_1}\right) \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^{\frac{1}{2}}\right] - \text{звуження,}$$

$$\zeta = \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 + \frac{9}{\sqrt{Re}} \cdot \left[1 - \psi \left(Re, \frac{F_0}{F_1}\right) \cdot \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^{\frac{1}{2}}\right] - \text{розширення,} \quad (2)$$

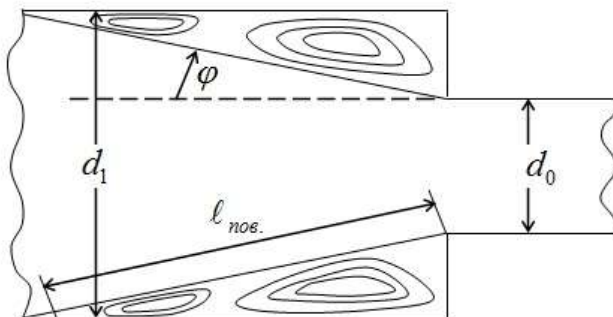
де  $\varphi$  і  $\psi$  – функції, що підлягають подальшому визначенню.

Вираз (2) можна пояснити таким чином. Коефіцієнт  $\zeta$  показує частку питомої кінетичної енергії, що витрачається на подолання місцевого опору. Ця частка може бути представлена як сума частки енергії, що пов'язана з прискоренням потоку, якщо має місце звуження, або з гальмуванням потоку, якщо має місце розширення, і поворотом потоку на деякий кут. Прискоренню або уповільненню відповідають перші доданки виразів (2), а повороту ліній струму – другі доданки. На підтвердження цього слід узяти до уваги, що частина енергії, яка витрачається на поворот, пропорційна величині кута повороту  $\varphi$ , який можна виразити через розміри каналу та довжину відрізка лінії струму при повороті (рис. 1):

$$\varphi \sim \arcsin \frac{d_2 - d_1}{2l_{\text{пов}}}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2},$$

$$\varphi(Re \rightarrow \infty) \rightarrow 0, \quad \varphi(Re \rightarrow 0) \rightarrow \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

де  $d_2$ ,  $d_1$  – діаметри широкої та вузької частин каналу відповідно, м;  $l_{\text{пов}}$  – довжина лінії струму на ділянці повороту.



**Рис. 1.** Течія на ділянці розширення каналу

Для ламінарної течії довжина  $l_{\text{пов}}$  пропорційна числу Рейнольдса та діаметру труби. Однак ця довжина є довжиною стабілізації та містить у собі як поворот лінії струму, так і прискорення (уповільнення) потоку на прямій ділянці, розташованій за місцевим опором. Виходячи з того, що загальний характер залежності  $\zeta$  від  $Re$  має степеневий характер, можна зробити висновок, що  $l_{\text{пов}} \approx d_1 Re^a$ , де  $a < 1$ , постійна. У розглянутому випадку  $a \approx 1/2$ . З урахуванням цих міркувань вираз (3) можна записати таким чином:

$$\varphi \sim \arcsin \left[ 1 - \left( \frac{F_0}{F_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] / Re^a, d_1 \sim F_1^{\frac{1}{2}}, d_0 \sim F_0^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Загальною властивістю виразів (2) є те, що  $\zeta \left( \frac{F_0}{F_1} = 1 \right) = 0$ . Це значить, що функції  $\varphi \left( Re, \frac{F_0}{F_1} = 0 \right) = 1$ ;  $\varphi \left( Re, \frac{F_0}{F_1} = 1 \right) = 1$ . Проте відомо, що при  $Re \rightarrow 1$  залежність  $\zeta$  від відношення  $\frac{F_0}{F_1}$  слабшає [7; 9]. За більших значень  $Re$  функції  $\varphi$  та  $\psi$  перестають залежати від  $Re$ . Можна побудувати багато виразів для  $\varphi$  та  $\psi$ . Їх вигляд варто вибрати на підставі даних експерименту.

Течія ньютонівської рідини при повороті визначається дією відцентрової сили, що викликає вторинні вихрові течії й обертання рідини в каналі [7; 9]. Течію в повороті можна подати як течію зі звуженнями й розширеннями для основної течії, відокремлюючи від неї вторинні течії (рис. 2).

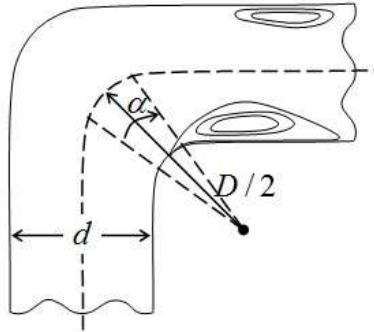


Рис. 2. Течія на ділянці повороту

Однак розміри й місце знаходження вторинних течій залежно від величини числа  $Re$  дослідженні недостатньо [10; 11], тому слід використати вирази для визначення місцевого опору та опору тертя під час течії ньютонівської рідини. Для поворотів із малим радіусом закруглення опором тертя можна знехтувати, оскільки повний опір майже дорівнює місцевому. Якщо  $Re \geq 2 \cdot 10^5$ , вираз для місцевого опору має такий вигляд [7; 9]:

$$\zeta \approx \frac{0,2\sqrt{2\beta}}{\pi} \left(\frac{C}{D}\right)^{0,25}, \quad (5)$$

де  $d$  – діаметр каналу, м;  $D$  – діаметр кола повороту, м;  $\beta$  – кут повороту, рад.

Для більших діаметрів кола повороту є формули в працях [7; 9], які можна записати в такому чином:

$$\zeta = \frac{aD}{2d} \left[ 2 + 50 \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{4}{3}} \right] \frac{1}{Re^{\frac{1}{2}}}, \quad 500 \leq Re \leq 6000,$$



$$\zeta = \frac{aD}{2d} \left[ 0,64 + 9 \left( \frac{d}{D} \right)^{\frac{4}{3}} \right] \frac{1}{\text{Re}^{\frac{1}{4}}}, \quad 6000 \leq \text{Re} \leq 40000. \quad (6)$$

Перші доданки в цих виразах являють собою частки втрати енергії на тертя, оскільки добуток  $aD$  – це довжина ділянки повороту, а  $\frac{1}{\text{Re}^2}$  та  $\frac{1}{\text{Re}^4}$  – пропорційні коефіцієнтам тертя. Другі доданки у

виразах (6) варто віднести до місцевих опорів. Як установлено, течія в трубах і каналах із поворотом характеризується числом Діна:

$De = \text{Re} \sqrt{\frac{d}{D}}$  [9]. Переписавши вирази для других доданків із формул

(6) через число  $De$  для місцевого опору повороту  $\zeta_M$ , бачимо, що в досить великому діапазоні значень числа  $\text{Re}$  будуть правильні такі вирази:

$$\begin{aligned} \zeta_M &\approx \frac{25a}{\left( \text{Re} \sqrt{\frac{d}{D}} \right)^{0,5}} \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^{0,58}, \quad 500 \leq \text{Re} \leq 6000; \quad \frac{d}{D} < \frac{1}{6}; \\ \zeta_M &\approx \frac{5a}{\left( \text{Re} \sqrt{\frac{d}{D}} \right)^{0,25}} \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^{0,45}, \quad 6000 \leq \text{Re} \leq 40000; \\ \zeta_M &\approx \frac{\sqrt{2}}{\pi} 0,2 \cdot a \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^{0,50}, \quad 20 \cdot 10^4 \leq \text{Re} < \infty. \end{aligned} \quad (7)$$

Використовуючи вирази для місцевого опору за більших діаметрів кола повороту можна записати аналогічні формули:

$$\zeta_M \approx \frac{35a}{\left( \text{Re} \sqrt{\frac{d}{D}} \right)^{0,50}} \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^{0,28}, \quad 500 \leq \text{Re} \leq 6000, \quad \frac{d}{D} > \frac{1}{6},$$

$$\zeta_M \approx \frac{7\alpha}{\left(\operatorname{Re} \sqrt{\frac{d}{D}}\right)^{0,25}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,23}, \quad 6000 \leq \operatorname{Re} \leq 40000,$$

$$\zeta_M \approx \frac{\sqrt{2 \cdot 6}}{\pi} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,25}, \quad 40 \cdot 10^4 \leq \operatorname{Re}. \quad (8)$$

Числові коефіцієнти у формулах (7) і (8) можна виразити через значення функцій від числа  $\operatorname{Re}$  різними аналітичними способами.

Для того щоб адаптувати вирази (2), (7), (8) до випадку степеневі рідини, необхідно замість числа  $\operatorname{Re}$ , визначеного для ньютонівської рідини, підставити число Рейнольдса для степеневі рідини. Останнє визначається за таким правилом [8]:

$$\operatorname{Re}_n = \frac{d^n \omega^{2-n} \rho}{\frac{\mu_0}{8} \left(6 + \frac{2}{n}\right)^n}, \quad \mu = \mu_0 \dot{\epsilon}^{n-1}, \quad (9)$$

де  $\operatorname{Re}_n$  – число Рейнольдса степеневі рідини;  $\mu$  – в'язкість степеневі рідини,  $\text{Па}(\text{с})^T$ ;  $\mu_0$  – в'язкість степеневі рідини за одиничної швидкості зрушення;  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $\dot{\epsilon}$  – швидкість зрушення,  $1/\text{с}$ ;  $\rho$  – густина рідини,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $d$  – діаметр труби, м;  $\omega$  – середня швидкість течії в трубі, м/с.

Висновки. Отримані вирази (2), (7), (8) разом із (9) дають можливість проводити експерименти з їх ідентифікацією та перевіркою, що в надалі дозволить визначити вид функцій  $\varphi$  та  $\psi$  із формули (2). Після цього їх можна використовувати для обчислення гідравлічних втрат тиску в трубопроводах і апаратах за умови течії в них степеневих (кремнійорганічних) рідин. Слід зазначити, що значення величин  $\mu_0$ ,  $n$ ,  $\rho$  потрібно брати з технічних довідників із кремнійорганічних рідин [1; 6].

#### Список джерел інформації / References

1. Алексеев П. Г. Свойства кремнийорганических жидкостей / П. Г. Алексеев, И. И. Скороходов, П. И. Поварнин. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – 230 с.

Alekseev, P., Skorohodov, I., Povarnin, P. (1997), *Properties of silicone fluids* [*Svoystva kremniyorganicheskikh zhidkostey*], Energoatomizdat, Moscow, 230 p.

2. Потапов В. О. Нові технічні рішення в проектуванні обладнання для теплової обробки харчової сировини : монографія в 3 ч. Ч. 1. Підвищення ефективності жарильного обладнання з використанням кремнійорганічних речовин / В. О. Потапов, О. В. Петренко. – Х. : ХДУХТ, 2012. – 139 с.

Potapov, V., Petrenko, O. (2012), *New technical solutions in the design of equipment for the heat treatment of food raw materials: monograph in 3 hours Part 1. Increasing the efficiency of frying equipment using silicon organic substances* [*Novi tehnicni rishennya v proektuvanni obladnannya dlya teplovoi obrobki harchovoyi sirovini. Ch.1. Pidvischennya efektyvnosti zharil'nogo obladnannya z vikoristannyam kremniyorganichnih rechovin*], KSUFIT, Kharkiv, 139 p.

3. Білецький Е. В. Кремнійорганічні сполуки: ошадливість, ефективність / Е. В. Білецький, О. В. Петренко // Харчова та переробна промисловість. – 2003. – № 4. – С. 18.

Biletskiy, E., Petrenko, O. (2003), "Organo-silicon compounds: thrift, efficiency" ["Kremniyorhanichni spoluky: oshchadlyvist, efektyvnist", *Kharchova ta pererobna promyslovisht*], No. 4, p. 18.

4. Петренко О. В. Застосування кремнійорганічного теплоносія в системі централізованого обігріву групи теплових апаратів / О. В. Петренко, Е. В. Білецький // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / ХДУХТ. – Харків, 2008. – Вип. 1 (7). – С. 208–213.

Petrenko, O., Biletskiy, E. (2008), "Application of Organic Silicon Organics in the System of Centralized Heating of a Group of Thermal Apparatuses", *Progressive engineering and technology of food production enterprises, catering business and trade* ["Zastosuvannya kremniyorhanichnoho teplonosiya v systemi tsentralizovanoho obihrivu hrupy teplovykh aparativ", *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnystv restorannoho hospodarstva i torhivli: zb. nauk. prats*], KSUFIT, Kharkiv, pp. 208-213.

5. Сафонов В. В. Застосування кремнійорганічного теплоносія в системі обігріву електричної сковороди з проміжним теплоносієм / В. В. Сафонов, О. В. Петренко, Е. В. Білецький // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / ХДУХТ. – Харків, 2007. – Вип. 1 (5). – С. 341–346.

Safonov, V., Petrenko, O., Biletskiy, E. (2007), "Application of an organosilicon carrier in the heating system of an electric frying pan with an intermediate coolant", *Progressive engineering and technology of food production enterprises, catering business and trade* ["Zastosuvannya kremniyorhanichnoho teplonosiya v systemi obihrivu elektrychnoyi skovorody z promizhnym teplonosiyem", *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnystv restorannoho hospodarstva i torhivli: zb. nauk. prats*], KSUFIT, Kharkiv, pp. 341-346.

6. Высокотемпературные теплоносители [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.libriz.net/.../80834-visokotemperaturnie-teplonositeli-i-ih-primenenie.html>

"High temperature coolants" ["Vysokotemperaturnyye teplonositeli"], available at: <http://www.libriz.net/.../80834-visokotemperaturnie-teplonositeli-i-ih-primenenie.html>

7. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М. : Недра, 1982. – 224 с.

Altshul, A. (1982), *Hydraulic resistance* [*Gidravlicheskie soprotivleniya*], Nedra, Moscow, 224 p.

8. Товажнянський Л. Л. Моделювання течій неньютонівський рідин у каналах базової геометрії: монографія / Л. Л. Товажнянський, Е. В. Білецький, Ю. А. Толчинський. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – 353 с.

Tovazhnyanskiy, L., Biletskiy, E., Tolchinskiy, Yu. (2013), *Modeling of non-Newtonian fluids in channels of basic geometry* [*Modelyuvannya techiy nenyutonivskih ridin u kanalah bazovoyi geometriyi*], NTU «ХПІ», Kharkiv, 353 p.

9. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) / А. Д. Гиргидов. – СПб. : СПбПУ, 2007. – 545 с.

Girgidov, A. (2007), *Fluid and Gas Mechanics (Hydraulics)* [*Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika)*], SPbPU, St. Petersburg, 545 p.

10. Полянин А. Д. Уравнения нестационарного пограничного слоя: общие преобразования и точные решения / А. Д. Полянин, В. Ф. Зайцев // Теор. основы хим. технологии. – 2001. – Т. 35. – С. 120–129.

Polyanin, A., Zaytsev, V. (2001), "Unsteady boundary layer equations: general transformations and exact solutions" ["Uravneniya nestatsionarnogo pogranchnogo sloya: obshchie preobrazovaniya i tochnyye resheniya"], *Teor. osnovy him. tehnologii*], Vol. 35, pp. 120-129.

11. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление / С. С. Кутателадзе. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 336 с.

Kutateladze, S. (1990), *Heat transfer and hydraulic resistance* [*Teploperedacha i gidravlichesкое soprotivlenie*], Energoatomizdat, Moscow, 336 p.

**Білецький Едуард Володимирович**, д-р техн. наук, проф., кафедра харчових технологій та готельно-ресторанного бізнесу, Харківський торговельно-економічний інститут Київського національного торговельно-економічного університету. Адреса: пров. Отакара Яроша, 8, м. Харків, Україна, 61045. Тел.: (057)340-38-24, 0679053732; e-mail: [bileckyj@meta.ua](mailto:bileckyj@meta.ua).

**Білецький Едуард Владимирович**, д-р техн. наук, проф., кафедра пищевых технологий и гостинично-ресторанного бизнеса, Харьковский торговельно-економический институт Киевского национального торговельно-економического университета. Адрес: пер. Отакара Яроша, 8, г. Харьков, Украина, 61045. Тел.: (057)340-38-24, 0679053732; e-mail: [bileckyj@meta.ua](mailto:bileckyj@meta.ua).

**Biletsky Eduard**, Dr. of Technical Sciences, Professor, Department of Food Technology and Hotel and Restaurant Business, Kharkiv Trade and Economics Institute Kyiv National Trade and Economic University. Address: side-str. O. Yarosha, 8, Kharkiv, Ukraine, 61045. Tel.: (057)340-38-24, 0679053732; e-mail: [bileckyj@meta.ua](mailto:bileckyj@meta.ua).

**Петренко Олена Володимирівна**, канд. техн. наук, доц., кафедра підготовки та перепідготовки фахівців холодильної та торговельної галузей, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел.: (057)349-45-88, 0677342916; e-mail: elenalion71@gmail.com.

**Петренко Елена Владимировна**, канд. техн. наук, кафедра підготовки та перепідготовки спеціалістів холодильної та торгової галузей, Харківський державний університет харчування та торгівлі. Адреса: вул. Клочковская, 333, г. Харків, Україна, 61045. Тел.: (057)349-45-88, 0677342916; e-mail: elenalion71@gmail.com.

**Petrenko Olena**, PhD, Associate Professor, Department of Training and Retraining of Refrigeration and Trade Specialists, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: Klochkivska str., 333, Kharkiv, Ukraine, 61045. Tel.: (057)349-45-88, 0677342916; e-mail: elenalion71@gmail.com.

DOI: 10.5281/zenodo.3592845