

3. Температурні поля подини та оцінка енергетичної ефективності при полуменовому обпаленні електролізерів великої потужності / С. В. Даниленко, Є. М. Панов, М. Ф. Боженко та ін. // Вісн. НТУУ «КПІ» ; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2010. – № 2 (6). – С. 27–33.
4. Порівняльні характеристики обпалення алюмінієвих електролізерів / С. В. Даниленко, Є. М. Панов, М. Ф. Боженко та ін. // Вісн. НТУУ «КПІ» ; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 1 (7). – С. 34–40.

Надійшла до редакції 26.10.2015

*Panov E. M., Bozhenko M. F., Danilenko S. V., Navozenko A. P.*

#### TEMPERATURE-THERMAL INDICATORS FOR FLAME BURNING ALUMINUM ELECTROLYZERS

*The summarizing results of studies about gas flame burning of electrolyzers with self-burning anodes in the amperage of 130 kA, about volume-average temperatures of the hearth and rates of change of temperature. Dimensionless equation for determining the average temperature of the hearth, for any period of time from the beginning of burning at a certain flow rate of natural gas and the surface temperature of hearth is proposed. Indicators of energy efficiency was identified and technological instruction of gas flame burning of electrolyzers was designed.*

**Keywords:** aluminum electrolyzers, hearth, flame burning, flow rate, energy efficiency.

#### References

1. Panov, E.N., Vasil'chenko G.N., Danilenko, S.V. et al. (1998), *Teplovye processy v jelektrolizerah i mikserah aljuminievogo proizvodstva* [Thermal processes in aluminum production electrolyzers and mixers], Ruda i metally, Moskow, Russia.
2. Gromov, B.S., Panov E.N., Bozhenko M.F. et al. (2001), *Obzhig i pusk aljuminievyh jelektrolizerov* [Firing and commissioning of aluminum electrolyzers], Ruda i metally, Moskow, Russia.
3. Danylenko, S.V., Panov, Ye.M., Bozhenko, M.F. et al. (2010), "Hearth temperature field and evaluation of energy efficiency in large capacity flame burning electrolyzers", *Khimichna inzheneriya, ekolohiya ta resursozberezhennya*, no 2 (6), p. 27–33.
4. Danylenko, S.V., Panov, Ye.M., Bozhenko, M.F. et al. (2011), "Comparative characteristics of heating in aluminum electrolyzers", *Khimichna inzheneriya, ekolohiya ta resurso-zberezhennya*, no 1 (7), p. 34–40.

УДК 678.057

СІВЕЦЬКИЙ В. І., к.т.н., проф.; СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.; КУШНІР М. С., ІВЦЬКИЙ І. І.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

#### МОДЕЛЮВАННЯ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ РОЗПЛАВІВ ТЕРМОПЛАСТІВ У БАР'ЄРНОМУ ЗМІШУВАЧІ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ ПРИСТІННОГО ПРОКОВЗУВАННЯ

*Проведено чисельне моделювання процесу температурної гомогенізації розплаву полімеру в динамічному змішувачі бар'єрного типу. Наведено результати моделювання, що дозволяють досліджувати динаміку зміни температур при течії полімерних матеріалів у змішувальних елементах, здійснювати вибір оптимальних конструктивних параметрів змішувальних елементів або обирати технологічні режими гомогенізації полімерних композицій.*

**Ключові слова:** динамічний змішувач, моделювання, гомогенізація, полімер.

© Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Кушнір М. С., Івцький І. І., 2016.

**Постановка проблеми.** Процеси змішування та гомогенізації в черв'ячних машинах мають важливе значення при переробці полімерних матеріалів, тому що якість змішування безпосередньо визначає якість виробу [1]. Для науково обґрунтованого конструктивного оформлення екструзійно-змішувального устаткування важливо знати основні закономірності процесів змішування та гомогенізації, які відбуваються в його різних конструктивних зонах.

Внаслідок різкого збільшення швидкості екструзії виникає ризик виносу непроплавлених частинок полімеру в зону формування, що може призвести до дефектів у виробі. Тому необхідно інтенсифікувати зсу-

вні деформації та перемішування розплаву, що сприятиме остаточному плавленню частинок полімеру та його гомогенізації. Найкращим методом досягнення достатньої гомогенізації розплаву є наявність на черв'яку зони змішування. Такі зони корисні для зменшення розмірів непроплавлених частинок полімеру до їх повного розплавлення, статистичного розподілення наповнювачів і для зменшення коливань температури розплаву перед виходом у зону формування.

**Аналіз попередніх досліджень.** У багатьох випадках якість змішування оцінюється за такими інтегральними показниками, як накопичена деформація й напруження зсуву [1–4]. Зазвичай, ці показники не дають можливості отримати повне уявлення про змішування. Невирішеною частиною наукової проблеми прогнозування змішувальної ефективності полімерного устаткування є складність її кількісного оцінювання [3]. Прямим критерієм оцінки якості змішування є концентрація диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі [4]. У разі введення компонентів композиції, що мають різні температури, таким критерієм може бути рівномірність температурного поля, тобто рівень температурної гомогенізації суміші. Ці дослідження присвячені чисельному моделюванню гомогенізації методом скінченних елементів [5, 6] на базі математичної моделі [4].

**Метою** статті є вивчення динаміки процесу та якості температурної гомогенізації полімерних композицій в черв'ячному екструдері, оснащеному динамічним змішувачем бар'єрного типу.

**Викладення основного матеріалу.** Процес температурної гомогенізації розплаву полімеру розглядають у динамічному змішувачі бар'єрного типу. Як критерій ефективності гомогенізації полімерів прийнято однорідність розподілу температур у суміші при проходженні каналів змішувача на різних перерізах за довжиною його робочого каналу.

Математичну модель багатокомпонентної суміші, частинним випадком якої є деформований стан полімерного матеріалу в каналі бар'єрного змішувача, і її дискретизацію методом скінченних елементів (МСЕ) наведено в праці [4]. Рух суміші та її складових розглядається в цій праці в рамках механіки суцільних середовищ із такими припущеннями:

1. Суміш складається з окремих взаємно проникних компонент, що заповнюють той самий об'єм. Кожна компонента є неперервним однорідним середовищем (континуумом), стан якого безпосередньо визначається власними параметрами стану.

2. Для кожної компоненти середовища діють закони збереження маси, імпульсу та енергії. Маса, імпульс та енергія суміші дорівнюють сумі мас, імпульсів та енергій її компонент. Взаємодія між компонентами суміші не змінює загальну величину маси, імпульсу та енергії суміші.

Числове моделювання процесу гомогенізації полімеру виконано у програмному комплексі ANSYS за допомогою програми Polyflow.

Для визначення впливу пристінних ефектів у процесі гомогенізації розглянуто кільцевий канал із модельним змішувачем, який містить один гребінь, що утворює зазор 1 мм (рис. 1).

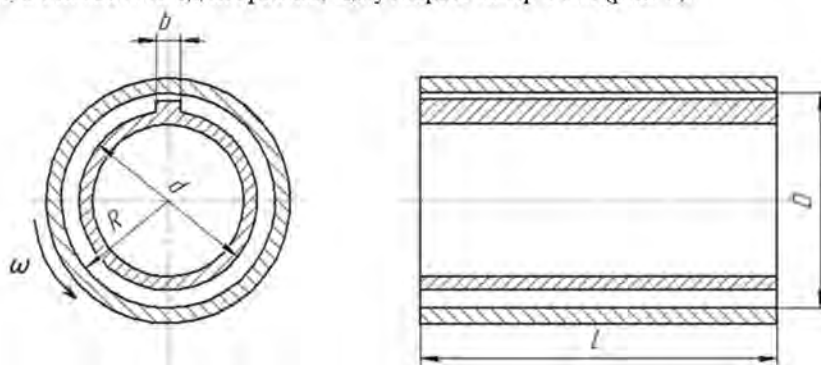


Рис. 1 – Схема модельного змішувача з одним гребенем

У цій статті наведено результати чисельного моделювання для температурної гомогенізації поліетилену високої густини марки ПЕВГ 15803-020. Реологічні й теплофізичні властивості матеріалу взято за температури 463 К: густина  $\rho = 975 \text{ кг/м}^3$ , теплоємність  $c_p = 2,0 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_T = 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . В'язкість задають степеневим законом Carreau-Yasuda:

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left[ 1 + (t\dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}}$$

де  $\mu_0$  – в'язкість зсуву за нульової поперечної швидкості;  $\mu_\infty$  – в'язкість зсуву за високої поперечної швидкості;  $a$  – індекс, що описує перехід від ньютонівської до степеневій поведінки;  $n$  – енергетичний показник;  $t$  – шкала часу (тобто обернена швидкості зсуву, за якої поведінка рідини змінюється з ньютонівської до степеневій);  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву.

Для досліджуваного матеріалу  $\mu = 113087,7 \cdot (1 + 1,34607\dot{\gamma}^{0,2620345})^{-2,4332}$ .

**Межові умови.** Швидкість обертання надаємо внутрішньому циліндру. Корпус вважаємо нерухомим. Досліджуємо умови прилипання й проковзування. Температури: диспергованого матеріалу  $t_1 = 363$  К; дисперсійного середовища  $t_2 = 463$  К; змішувача  $t_{зм} = 463$  К; корпусу  $t_k = 463$  К. За умов прилипання швидкості в межових шарах дорівнюють нулю ( $V_{гп} = 0$ ). Довжину входної ділянки вибрано такою, щоб на вході в зону бар'єрного змішувача спостерігався параболический розподіл швидкостей. Коефіцієнт проковзування на стінці (рис. 2) було визначено експериментальним шляхом [7]. Швидкість руху полімеру на вході в канал змішувача – 60 мм/с. Параметри змішувача: довжина  $L = 100$  мм; внутрішній діаметр  $D = 60$  мм; діаметр внутрішнього циліндра  $d = 50$  мм; ширина гребеня  $b = 7$  мм; зовнішній радіус гребеня  $R = 29$  мм.

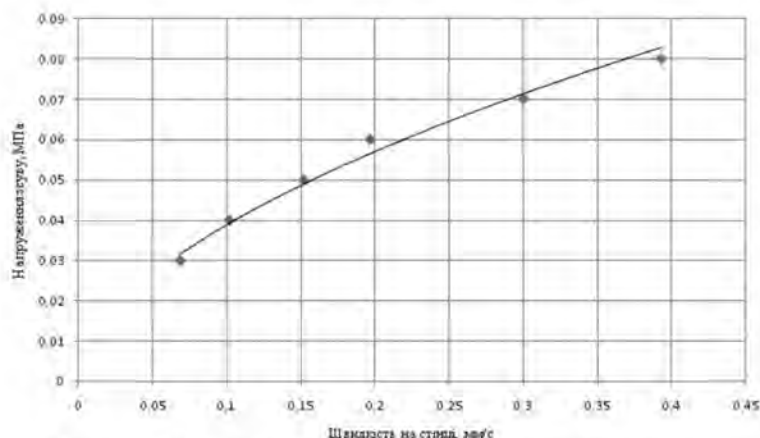


Рис. 2 – Залежність напруження зсуву від швидкості на стінці для ПЕВГ 15803-020 [7]



Рис. 3 – Розподіл температур у поздовжньому циліндричному перерізі робочого каналу на відстані 0,5 мм за швидкості обертання  $60 \text{ хв}^{-1}$

на виході за  $30 \text{ хв}^{-1}$  є найнижчим (458 К), нахил кривої плавно змінюється за всією довжиною. Це свідчить про те, що температура не встигла усереднитися. За  $60 \text{ хв}^{-1}$  на відстані від 0 до 0,04 м спостерігається різке

Щоб оцінити температурне поле в робочих зазорах змішувача з одним бар'єром, досліджували різні площини за висотою зазора між корпусом і гребенем, корпусом і ротором (рис. 3). Установлено, що при набіганні на гребень внаслідок зміни режиму течії матеріалу перед гребенем, у зазорі над ним і за ним спостерігається інтенсивний перерозподіл температури. Унаслідок різкої зміни висоти кільцевого каналу зростає гідравлічний опір, що зумовлює розтікання диспергованого матеріалу в дисперсійному середовищі. Із збільшенням швидкості обертання інтенсивність деформування зростає. Крок руху за спіраллю в каналі змішувача зменшується.

Із зменшенням висоти зазора між поверхнею корпусу і гребенем інтенсивність розтікання компонентів суміші зростає. У зазорі температура підвищується значно більше. За гребенем спостерігається зона усереднення температури суміші. Це зумовлено циркуляцією потоків матеріалу за висотою кільцевого каналу.

На рис. 4 наведено результати розрахунків середньої температури суміші у вузлових точках робочих каналів змішувача для шести перерізів за довжиною.

Із збільшенням швидкості обертання з 30 до  $90 \text{ хв}^{-1}$  (рис. 4, а) різниця температур зменшилася з 54 до 32 К, тобто якість гомогенізації виросла в 1,67 раза. За більшої швидкості вирівнювання температури відбувається краще. Середнє значення температури

зростання середньої температури до 459 К. Далі відбувається її зниження на 3 К завдяки змішуванню з диспергованим середовищем. За  $90 \text{ хв}^{-1}$  на відстані від 0 до 0,04 м середня температура зростає з 444 до 459 К, а далі зменшується до 457 К завдяки змішуванню з диспергованим матеріалом.

Зменшення різниці температур на виході з робочого каналу змішувача пришвидшується із зростанням швидкості обертання. За  $30 \text{ хв}^{-1}$  інтенсивність гомогенізації ще недостатня, за  $60$  і  $90 \text{ хв}^{-1}$  відбувається різке скорочення різниці температур, обумовлене зростанням швидкості зсуву й перерозподілом швидкостей перед бар'єром і за ним.

За різної швидкості обертання за умов проковзування розподіл середньої температури за довжиною змішувача відбувається за схожою схемою. Різниця температур у вихідному перерізі за  $90 \text{ хв}^{-1}$  становить 21 К (рис. 4, б), тобто є меншою, аніж за умов прилипання. Максимальна температура за умов прилипання становить 474 К, за умов проковзування – 466 К.

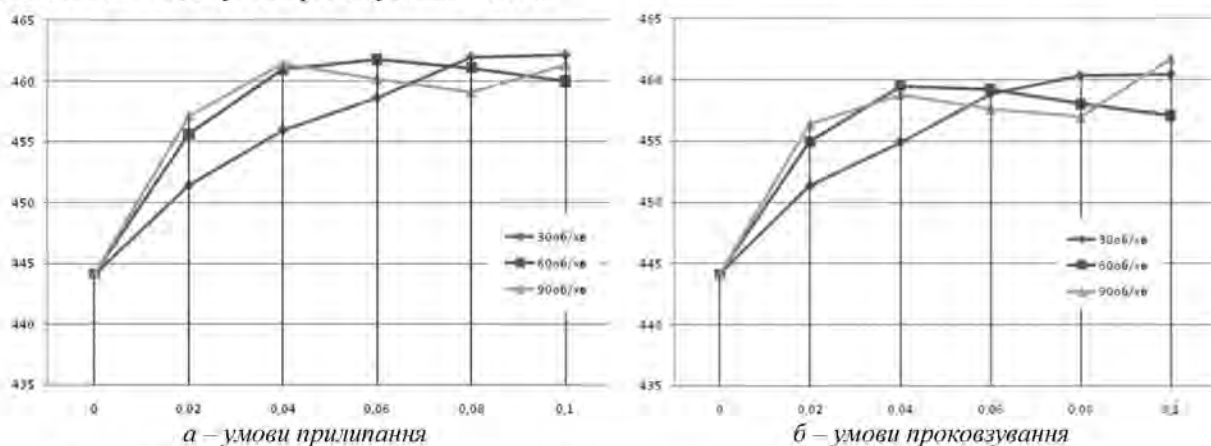


Рис. 4 – Розподіл середньої температури, К, у поперечних перерізах за довжиною змішувача, м

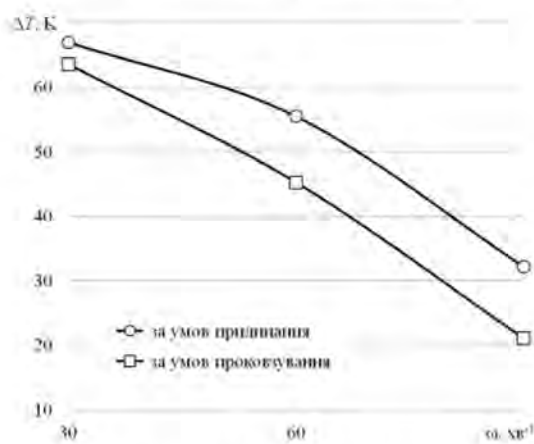


Рис. 5 – Розподіл різниці температур у вихідному перерізі бар'єрного змішувача за різної швидкості обертання

Порівняльний аналіз здійснювали за різницею температур суміші у вихідному перерізі змішувача за умов прилипання матеріалу до стінок і його проковзування (рис. 5). Установлено, що під час проковзування матеріал менше прогрівається, оскільки його швидкість біля стінок не дорівнює нулю. Дисипація енергії також зменшується, оскільки проковзування присутнє як на стінках, так і на роторі змішувача.

**Висновок.** Дослідження бар'єрного змішувача довели ефективність оцінки процесів гомогенізації полімерних композицій методом числового моделювання із використанням як критеріїв оцінки змінення розподілу й різниці температур полімерних матеріалів у контрольних перерізах. Установлено, що проковзування позитивно впливає на ефективність змішувачів бар'єрного типу, тому при їхньому проектуванні слід враховувати цей ефект.

У подальшому передбачається вивчити вплив на ефективність змішувачів бар'єрного типу інших технологічних параметрів та їхнього конструктивного оформлення.

#### Список використаної літератури

1. Ким В. С. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс / В. С. Ким, В. В. Скачков. – М. : Химия, 1988. – 240 с.
2. Основы технологии переработки пластмасс / под ред. В. Н. Кулезнёва и В. К. Гусева. – М. : Химия, 2004. – 596 с.
3. Сівецький В. І. Комп'ютерне моделювання та проектування екструзійного полімерного устаткування / В. І. Сівецький Д. Е., Сідоров, О. Л., Сокольський. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – 188 с.

4. Моделирование процесса смешения полимерных композиций в экструзионном смесителе барьерного типа // А. С. Сахаров, А. Е. Колосов, А. Л. Сокольский, В. И. Сивецкий // Хим. и нефтегазовое машиностр. – 2011. – № 12. – С. 3–7.
5. Метод конечных элементов в механике твердых тел / под общ. ред. А. Сахарова и И. Альтенбаха. – К. : Вища шк., 1982. – 480 с.
6. Киричевский В. В. Нелинейные задачи термомеханики конструкций из слабосжимаемых эластомеров / В. В. Киричевский, А. С. Сахаров. – К. : Будівельник, 1992. – 216 с.
7. Сокольский А. Л. Методика учета пристенного скольжения полимера при моделировании каналов перерабатывающего оборудования / А. Л. Сокольский, И. И. Ивицкий // SWorld : сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 3 (36). – Т. 4. – С. 106-112.

Надійшла до редакції 09.06.2015

*Sivetskyi V. I., Sokolskyi O. L., Kushnir M. S., Ivitskyi I. I.*

#### **MODELING OF THERMOPLASTIC MELTS HOMOGENIZATION IN BARRIER MIXER WITH WALL SLIP EFFECT CONSIDERATION**

*Processes of mixing and homogenization in screw machines are very important when the processing polymeric materials because the quality of these processes determines the quality of the product. For the scientifically-based structural design of extrusion-mixing equipment it is important to know the basic laws of mixing and homogenization processes that occur in its different structural zones.*

*In many cases, the quality of mixing is estimated by the integral indicators such as accumulated strain shear, stress shear and others. Usually, these figures do not always give a complete picture of the mixing process. The difficulty of quantitative evaluation is the unsolved problem of the scientific prediction of the mixing efficiency of polymer research equipment. If the input components of the composition are at different temperatures these criteria may be stability of the temperature field, i.e. the level of temperature homogenization of the mixture. These studies are devoted to numerous modelling of homogenization processes.*

*The process of homogenization of polymer melt is studied in a dynamic barrier type mixer. The efficiency criteria of polymers homogenization is the temperature distribution in the mixing passage of the mixer channels at different sections along the length of its working channel.*

*To determine the effect of the gap between the flange and the inner surface of the mixer we look at the circular channel of the mixer which contains only one flange, forming gap of 1 mm. Research take into account the coefficient of sliding of the side and are determined experimentally.*

*The results of numerous studies show that when incidence on the flange we can find an intense redistribution of temperature polymeric material in the working channel. Due to sudden changes in the elevation of the annular channel substantially increases hydraulic resistance, which leads to the spreading of dispersed material in the dispersion environment. Intensity of deformation increases by increasing the speed. The temperature difference at the output in conditions of slipping material on the side decreases compared to the temperature difference in the conditions of adhesion.*

*Comparative analysis of numerical studies conducted mixing a barrier to an average temperature of the mixture and the temperature difference between the original section of the mixer in conditions of material sticking to the walls and under the conditions it slip.*

*Studies have shown the effectiveness of assessment processes homogenization polymer compositions using as criteria change distribution and polymer material temperature difference in control sections by numerical simulations. It was established that the effect of slippage positive impact on mixing efficiency barrier-type mixer, so the design of the mixer must consider it.*

**Keywords:** *dynamic mixer, modeling, homogenization, polymer.*

#### **References**

1. Kym, V.S. and Skachkov, V.V. (1988), *Dysperhyrovanye y smeshenye v protsesakh proizvodstva y pererabotky plastmass* [Dispersion and mixing processes in the production and processing of plastics], Khymyia, Moskow, USSR.
2. Vlasov, S.V., Kalynchev, E.L., Kandyryn, L.B. et al. (2004), *Osnovy tekhnolohyy pererabotky plastmass* [The basic technology of plastics processing], Khymyia, Moskow, Russia.

3. Sivetskiy, V.I., Sidorov, D.E. and Sokolskiy, O.L. (2007), *Kompiuterne modelivannia ta proektuvannia ekstruziinoho polimernoho ustatkuvannia* [Computer simulation and design of polymer extrusion equipment], NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine.
4. Sakharov, A.S., Kolosov, A.E., Sokolskiy, A.L. and Syvetskiy, V.Y. (2011), "Modeling the mixing process of polymer compounds in the extrusion barrier-type mixer", *Khymycheskoe y neftefazovoe mashynostroenye*, vol. 12, pp. 3–7.
5. Sakharov, A. and Altenbakh, I. (1982), *Metod konechnykh elementov v mekhanike tverdykh tel* [The finite element method in solid mechanics], Vyscha shkola, Kyiv, USSR.
6. Kyrychevskiy, V.V. and Sakharov, A.S. (1992), *Nelyneinye zadachy termomekhaniky konstruktivnykh slabszhymaemykh elastomerov* [Nonlinear problems of thermomechanical structures of slightly compressible elastomers], Budivelnyk, Kyiv, Ukraine.
7. Sokolskiy, A.L. and Yvytskyi, Y.Y. (2014), "Method of accounting wall slip polymer in modeling channel processing equipment", *SWorld*, no 3 (36), pp. 106–112.

УДК 536.423.1:66.045

ШАПОВАЛ А. А., к.т.н., доц.; ПАНОВ Є. М., д.т.н., проф.; СТРЕЛЬЦОВА Ю. В., асп.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ЗАКИПАННЯ ВОДИ НА ПОРИСТИХ ПОВЕРХНЯХ: ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ

Наведено результати експериментальних досліджень впливу фізичних характеристик металевих волокнистих матеріалів на початок закипання води на пористих поверхнях за умов її вільного руху й капілярного транспорту. Досліди виконано за допомогою спеціально створеної експериментальної установки, що імітує умови функціонування теплових труб і термосифонів. Такі умови є типовими для роботи двофазних теплопередавальних пристроїв. Основні характеристики зразків металевих пористих капілярних матеріалів (МПКМ) змінювали у широких діапазонах значень. Дослідження свідчать, що за умов вільного руху рідини зміна пористості мідних металоволокнистих матеріалів впливає на температурні напори, за яких на пористих поверхнях починаються процеси, аналогічні закипанню води на гладких технічних поверхнях. Усі досліджені у роботі характеристики МПКМ впливають на значення температурних напорів початку закипання води. Із зменшенням пористості металоволокнистих матеріалів капілярні сили Лапласа перешкоджають виходу парової фази крізь парові канали-стволови. Одночасно зменшення пористості капілярних структур призводить до збільшення їх каркасної теплопровідності, що сприяє швидкій активації парових зародків, і зменшує температурні напори початку закипання порівняно з умовами закипання на гладких технічних поверхнях. Превалює вплив пористості капілярно-пористих матеріалів, що можна пояснити збільшенням кількості відносно крупних пор і полегшенням умов виходу утворюваної парової фази у випадках застосування високопористих металевих матеріалів-покривів. Результати узагальнено у вигляді простих емпіричних формул, придатних для інженерних розрахунків температурних напорів, за яких починається генерування парової фази на пористих поверхнях, тобто закипання води. Формули запропоновано для умов, типових як для вільного руху води на повністю «залитих» пористих поверхнях (функціонування термосифонів), так і для капілярного транспорту води (робота теплових труб).

**Ключові слова:** закипання, пористі матеріали, капілярні структури, теплові труби, термосифони, пористість, теплопровідність.

© Шаповал А. А., Панов Є. М., Стрельцова Ю. В., 2016.

**Постановка проблеми.** Дослідження впливу характеристик металевих капілярно-пористих матеріалів (МПКМ) [1, 2], приєднаних до поверхонь зон нагрівання елементів технічних пристроїв, на початок кипіння (закипання) води та органічних рідин на таких поверхнях є важливою науково-технічною задачею. Зазначені матеріали, зокрема, є функціональними робочими елементами двофазних теплопередавальних пристроїв: теплових труб і термосифонів [3–5], розвиток та практичне застосування яких є одним із аспектів сучасної теплофізики та теплоенергетики [4–6].

Металеві капілярно-пористі матеріали мають низку фізико-технічних характеристик, що залежать від типів та особливостей виготовлення МПКМ. До визначальних характеристик МПКМ належать порис-