

**К. Є. ЛИСЕНКО**

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛО- ТА МАСОПЕРЕНОСУ В КРИОГЕННО-ГРАВІЙНОМУ ФІЛЬТРІ

**АНОТАЦІЯ** Розглядається процес промерзання вологого дисперсного середовища криогенно-гравійного фільтра. Запропоновано математичну модель та чисельну методику розрахунку параметрів фільтра. Визначено ефективні режими виготовлення гравійних фільтрів при криогенному способі заморожування. Проведено дослідження промерзання гравійного фільтра та визначено залежність температури фільтра, вологості, часу промерзання від умов та способу заморожування. Результати дослідження представляють інтерес при визначенні часових характеристик заморожування криогенно-гравійних фільтрів, та дозволяють прогнозувати їх експлуатаційні параметри під час обладнання гідрогеологічних свердловин.

**Ключові слова:** гравійний фільтр, криогенна технологія, дисперсне вологе середовище, фазові перетворення.

**K. LYSENKO**

### STUDY OF THE HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN CRYOGENICALLY-GRAVEL FILTER

**ABSTRACT** The article deals with the freezing processes of the gravel filters during their manufacture and operation in order to improve low-temperature technology. We consider the low-temperature technology of gravel filters and shows the need for studies to determine the heat and mass transfer processes of rational technology parameters. The mathematical model and numerical method of calculation of the filter parameters was considered. We propose and justify a model of cryogen technology of freezing gravel, have developed a numerical method for calculating the parameters of the process. The effective parameters of low-temperature technology and the exploitation of gravel filters. A study of freezing gravel and determined the dependence of the filter temperature, humidity, time of freezing on the conditions and method of freezing. The outcomes are interesting for determining of freezing time of the cryogenically-gravel filters, and allows them to predict the operational parameters during the equipment of water wells. Developed recommendations for determination of parameters low-temperature production and operation gravel filters.

**Key words:** gravel filter, cryogenically technology, wet dispersion medium, phase transformations.

#### Вступ

Гравійні фільтри є елементами обладнання гідрогеологічних, нафтових або геотехнічних свердловин, які призначені для зменшення концентрації домішок в рідині, що видобувається, та підвищення дебету свердловини [1, 2]. Сучасна тенденція до зростання попиту на питну воду та незадовільні якісні показники поверхневих вод, обумовлює все більше використання підземних вод. Для видобутку якіснішої води необхідно збільшувати глибину свердловин, при цьому ускладнюється їх конструкція. В зв'язку з цим підвищуються вимоги до надійності, ефективності та довговічності фільтрів. Існуючі конструкції гравійних фільтрів не завжди задовольняють новим вимогам, зокрема з точки зору забезпечення міцності конструкції під час встановлення фільтра на забій. На сьогодні розробляються нові технології виготовлення опускних гравійних фільтрів, в якій міцність конструкції забезпечується за рахунок фазового переходу в'язучої речовини в середині матеріалу фільтра [3, 4]. Для цього пропонується використовувати заморожування під час виготовлення фільтра та зворотний фазовий перехід при встановленні його в робоче положення. Таким чином, така технологія пов'язана з використанням низьких температур для виготовлення фільтрів.

Визначення раціональних параметрів та режимів низькотемпературної технології виготовлення гравійних фільтрів потребує вивчення та аналізу тепло- та масообмінних процесів в дисперсному середовищі, що представляє собою корпус фільтра. Одним із ефективних інструментів дослідження є методи математичного моделювання з проведенням обчислювального експерименту на ЕОМ. Слід також зазначити, що можливості проведення фізичного експерименту також обмежені в більшості практично важливих випадків, зокрема, для вивчення теплових процесів в свердловині. Переважна більшість дослідників для аналізу тепломасообмінних процесів в дисперсному середовищі за наявності фазових переходів звертається до методів чисельного моделювання.

Таким чином створення математичної моделі й методики розрахунку, проведення параметричних досліджень та визначення ефективних режимів виготовлення та експлуатації низькотемпературних гравійних фільтрів представляється актуальною задачею технічної теплофізики.

#### Мета роботи

Визначення параметрів процесів криогенного промерзання гравійних фільтрів, які забезпечують міцність конструкції фільтра під час прове-

дення монтажних робіт і спуску в свердловину.

### Викладення основного матеріалу

У роботі [2] запропоновано класифікацію способів виготовлення гравійних фільтрів в залежності від конструктивних особливостей бурової свердловини. В роботах [3, 4] наводиться опис криогенної технології виготовлення фільтрів на основі експериментальних та польових досліджень.

Питанню моделювання процесів заморожування або розморожування дисперсного середовища, зокрема ґрунтів, присвячена велика кількість робіт, зокрема [5–8] та інші, в яких практичний інтерес представляє дослідження промерзання та усадки ґрунтів, сушка капілярно-пористих матеріалів. Проте, кілька специфічних аспектів, які стосуються саме криогенно-гравійних фільтрів, у цих математичних моделях не розглядається.

Математична модель теплопереносу при промерзанні та розморожування криогенно-гравійного без урахування вологопереносу була побудована у [9], де також представлені результати моделювання у вигляді температурних полів та показано адекватність даної моделі. Моделювання переносу тепла та вологи під час промерзання та розморожування в дисперсному водонасиченому середовищі було проведено в [10, 11].

Гравійний фільтр представляє собою циліндричну конструкцію з пористого матеріалу, яка складається з декількох блоків. Матеріалом фільтру є суміш дрібнозернистого гравію та водяного розчину. Жорстка форма та металева основа є знімними. Під час виготовлення блоків фільтру має місце процес заморожування конструкції до отримання монолітної структури.

Зробимо кілька припущень, щодо фізичної та математичної моделі. Знехтуємо процесами «спучування» матеріалу вологого гравію під час заморожування, а також кількістю зв'язаною води, що залишається не замерзлої. Будем вважати, що дрібно дисперсного матеріалу фільтру процес фазового перетворення відбувається у вузькому інтервалі температур, та для його опису можна використати експериментальну функцію «вмісту льоду».

Будемо розглядати один блок гравійного фільтру, як показано на рис. 1.

Математична модель процесу зводиться до системи рівнянь теплопровідності та масопередачі, з використанням ефективної теплоємності:

$$c_{ef}(T, U)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T, U)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T, U)\frac{\partial T}{\partial z}\right),$$

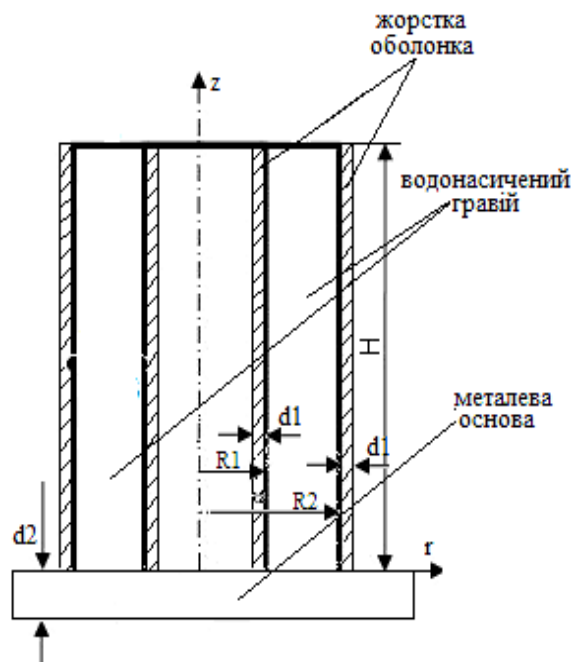


Рис. 1 – Модель гравійного фільтру

$$\tau > 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad 0 < z < H,$$

$$T|_{r=0} = T_0,$$

$$\left[ \pm \lambda_{R_1, R_2} \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha_{R_1, R_2} T \right]_{r=R_1, R_2} = q_{R_1, R_2},$$

$$\left[ \pm \lambda_{0, H} \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha_{0, H} T \right]_{z=0, H} = q_{0, H},$$

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rk(T, U) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(T, U) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial z} \right),$$

$$\tilde{U}(r, z, 0) = U_0,$$

$$k(T, U) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = k(T, U) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = 0,$$

$$k(T, U) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial z} \Big|_{z=0} = k(T, U) \frac{\partial \tilde{U}}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0,$$

де  $R_1, R_2$  – внутрішній та зовнішній радіуси зразка блоку фільтру;  $H$  – висота фільтру;  $T_0$  – початкова температура;  $\tilde{U}$  – фіктивний вологовміст;  $U_0$  – початковий вологовміст;  $c_{ef}$  – ефективні теплоємність;  $\rho$  – густина;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $k$  – коефіцієнт дифузії середовища фільтру;  $i(T)$  – функція льодистості;  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну відповідної поверхні з навколишнім середовищем;  $q$  – тепловий потік, який підводиться до тіла або відводиться від нього.

Функція льодистості  $i(T)$  має вигляд

$$i(T) = \begin{cases} 0, & T > T_n \\ i_k \frac{1 - e^{n(T-T_n)}}{1 - e^{n(T_k-T_n)}}, & T_n \geq T \geq T_k \\ i_k, & T < T_k \end{cases}$$

де  $i_k$  – значення льодистості при температурі  $T_k$ , яке залежить від кількості міцнозв'язаної вологи;  $T_n, T_k$  – температура початку та кінця фазового переходу, відповідно;  $n$  – коефіцієнт, який характеризує ступінь зв'язаності води з дисперсним матеріалом. Коефіцієнт  $n$  залежить від дисперсності і структурного складу матеріалу. Відомо, що чим сильніше зв'язана вода в порах, тим менше  $n$ , а при замерзанні вільної води  $n \rightarrow \infty$ .

Результати чисельного розв'язання задачі для випадку низькотемпературного способу заморожування охолодженим повітрям приведені в роботах [10, 11].

Проте, такий спосіб виготовлення гравійних фільтрів має місце лише для неглибоких свердловин (до 100 м). Для глибших свердловин доцільно використовувати криогенні способи заморожування, зокрема будемо використовувати заморожування рідким азотом.

### Обговорення результатів

Для аналізу характеру розподілу температури і вологості в досліджуваній області фільтру наведено графіки (рис. 2 та рис. 3), на яких показано розподіл температури та вологості по радіусу в середньому перерізі стінки фільтру при початковій температурі заготовки фільтру  $15^\circ\text{C}$ , початковій вологості  $20\%$ , температура в морозильній камері  $-20^\circ\text{C}$ . Через 1,2 години на внутрішній і зовнішній поверхнях стінки утворюється мерзла зона, що супроводжується стрибком кривої сумарного вологовмісту (рис. 3). В процесі промерзання області фільтру відбувається неперервне збільшення вологовмісту мерзлої зони, а в талій – вологовміст постійно зменшується, має місце міграція вологи з талої зони в мерзлу, тобто осушення талої зони. Найменшого значення вологовміст приймає на границі фазового перетворення.

Залежності часових параметрів при криогенному способі заморожування гравійного фільтру від температури в морозильній камері показано на рис. 4, де  $\tau_f$  – інтервал часу, необхідний для просування фронту фазового перетворення всередину стінки.

Залежність для часу, за який температура поверхні фільтру досягне температури морозильної камери представлений на рис. 5, де  $\tau_\infty$  – інтервал часу.

З аналізу теплофізичних процесів в дисперсному середовищі під час заморожування гравій-

ного фільтру зроблено висновок, що визначальними параметрами при оцінці тривалості виготовлення одного блоку фільтру заданих розмірів є: спосіб заморожування заготовки фільтру, температура морозильної камери, початкова температура заготовки. Значення початкової вологості заготовки та її дисперсності у межах, зазначених технологічно, на тривалість процесу заморожування блоку фільтру суттєво не впливають.

Для виготовлення криогенно-гравійного фільтру під час заморожування рідким азотом тривалість виготовлення одного блоку фільтру із заданими вище параметрами в залежності від початкової температури і температури в криогенній камері дорівнюватиме:

– для мінімальної початкової температури заготовки фільтру  $5^\circ\text{C}$  від 2 годин при температурі морозильної камери  $-50^\circ\text{C}$  до 2 годин 20 хвилин при температурі морозильної камери  $-100^\circ\text{C}$ ;

– для максимальної початкової температури заготовки фільтру  $25^\circ\text{C}$  від 3 годин 9 хвилин при температурі морозильної камери  $-50^\circ\text{C}$  до 3 години 20 хвилин при температурі морозильної камери  $-100^\circ\text{C}$ . Перевагами криогенного способу заморожування гравійних фільтрів перед повітряним заморожуванням є висока швидкість процесу заморожування та широкий діапазон кінцевих температур. Використання криогенних способів заморожування під час виготовлення гравійних фільтрів значно розширює сферу використання конструкцій з фільтрами. Однак, використання рідкого азоту для заморожки фільтрів пов'язано з технологічною складністю та високою вартістю процесу виготовлення фільтрових блоків, що є основною проблемою даної технології.

Кінцева температура заморожування гравійного фільтру вибирається в залежності від технологічних вимог до експлуатаційних характеристик фільтру: умов теплообміну з навколишнім середовищем під час проведення підготовчих робіт перед спуском фільтру у робочу область, глибини свердловини, швидкості спуску фільтрової колони.

Для забезпечення достатньої міцності конструкції та запобігання передчасному руйнуванню конструкції фільтру температуру його заморожування необхідно вибирати, виходячи з умови

$$\tau_p \geq \tau_m,$$

де  $\tau_p$  – проміжок часу, за який почнеться розморожування фільтру;  $\tau_m$  – інтервал часу, необхідний на проведення операцій по підготовці та спуску блоків фільтру в робочу зону.

Значення  $\tau_m$  залежить від тривалості встановлення та транспортування фільтрів у свердловину і визначається згідно технології. Оцінка величини  $\tau_p$  проведена в роботі [11].

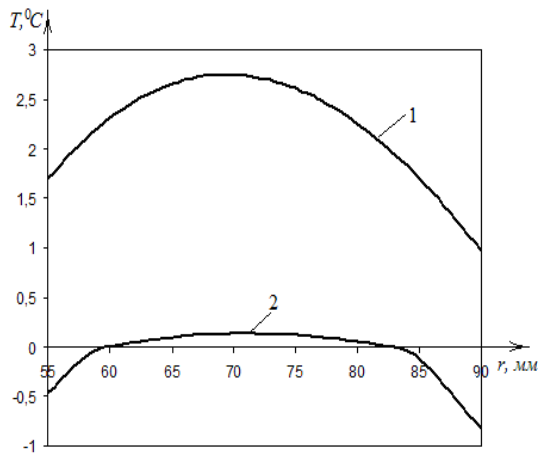


Рис. 2 – Розподіл температури по радіусу:  
1 – через 1 годину; 2 – через 1,2 години

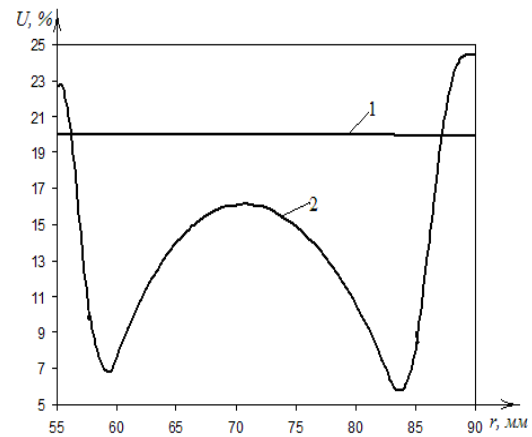


Рис. 3 – Розподіл сумарного вологовмісту по радіусу:  
1 – через 1 годину; 2 – через 1,2 години

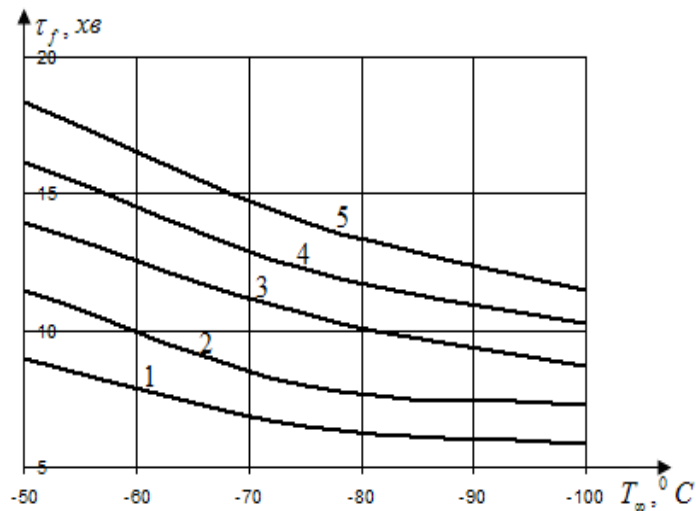


Рис. 4 – Інтервал часу, необхідний для просування фронту фазового перетворення всередину стінки фільтру: 1 –  $T_0 = 5$  °C; 2 –  $T_0 = 10$  °C;  
3 –  $T_0 = 15$  °C; 4 –  $T_0 = 20$  °C; 5 –  $T_0 = 25$  °C

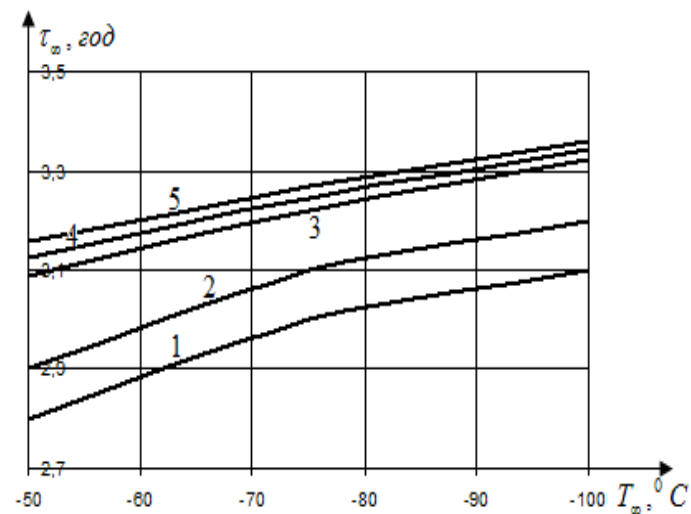


Рис. 5 – Інтервал часу, необхідний для просування фронту фазового перетворення всередину стінки фільтру: 1 –  $T_0 = 5$  °C; 2 –  $T_0 = 10$  °C;  
3 –  $T_0 = 15$  °C; 4 –  $T_0 = 20$  °C; 5 –  $T_0 = 25$  °C

## Висновки

Виконано дослідження процесу криогенного заморожування елементу блочного гравійного фільтру та представлено залежність температурних та вологісних полів гравійного фільтру від температури в морозильній камері та початкових умов. Визначено тривалість витримки блоку фільтру в залежності від температури в морозильній камері.

Результати розрахунку дозволяють визначати часові характеристики заморожування низькотемпературних гравійних фільтрів, та прогнозувати їх розморожування під час обладнання гідрогеологічних свердловин.

## Список літератури

- 1 **Башкатов, А. Д.** Прогрессивные технологии сооружения скважин [Текст] / **А. Д. Башкатов.** – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 554 с. : ил. – ISBN 5-8365-0153-X.
- 2 **Кожевников, А. О.** Классификация способов создания гравийных фильтров [Текст] / **А. О. Кожевников, А. К. Судаков** // Научный вестник Национального горничого университета. – 2010. – № 9–10. – С. 70–74. – ISSN (print) 2071-2227, ISSN (online) 2223-2362.
- 3 **Кожевников, А. О.** Технология изготовления блочного криогенно-гравийного фильтра буровых свердловин [Текст] / **А. О. Кожевников, А. К. Судаков, О. Ф. Камишацкий, О. А. Лексиков, Д. А. Судакова** // Научные работы Донецкого национального технического университета. Сер.: Горничого-геологична. – 2010. – Вып. 14(181). – С. 83–86. – ISSN 1996-1588, ISSN 1680-0044.
- 4 **Кожевников, А. А.** Гравийные фильтры с использованием эффекта двухфазного инверсного перехода агрегатного состояния вязущего вещества [Текст] / **А. А. Кожевников, А. К. Судаков, А. А. Гриняк** // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения : Сб. науч. трудов. – Киев : ИСМ им. Бакуля Национальной академии наук Украины, 2008. – Вып. 11. – С. 84–88.
- 5 **Пермяков, П. П.** Идентификация параметров математической модели теплового переноса в мерзлых грунтах [Текст] / **П. П. Пермяков.** – Новосибирск : Наука. Сиб. отделение, 1989. – 86 с.
- 6 **Приходько, А. А.** Численное моделирование процессов фазовых переходов пористых сред на основе решения задачи Стефана и метода эффективной теплоёмкости [Текст] / **А. А. Приходько, С. В. Алексеенко** // Вестник Днепропетровского государственного университета. Серия: Механика. – 2001. – Вып. 5, Т. 1. – С. 117–125.
- 7 **Лыков, А. В.** Теория сушки [Текст] / **А. В. Лыков.** – М. : Энергия, 1968. – 472 с.
- 8 **Никитенко, Н. И.** Динамика процессов теплопереноса, фазовых превращений и усадки при обезвоживании коллоидных капиллярно-пористых материалов [Текст] / **Н. И. Никитенко, Ю. Ф. Снежкин, Н. Н. Сороковая** // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 3. – С. 56–66.
- 9 **Дреус, А. Ю.** Математическое моделирование тепловых процессов в гравийных фильтрах гидрогеологических скважин [Текст] / **А. Ю. Дреус, А. А. Кожевников, Е. Е. Лысенко, А. К. Судаков** // Доповіді національної академії наук України: Серія: Науки про Землю. – 2010. – № 9. – С. 98–102. – ISSN 1025-6415.
- 10 **Кожевников, А. А.** Исследование теплопереноса в криогенно-гравийном фильтре при его транспортировке по стволу скважины [Текст] / **А. А. Кожевников, А. К. Судаков, А. Ю. Дреус, Е. Е. Лысенко** // Научный вестник Национального горничого университета. – 2013. – № 6. – С. 49–54. – ISSN (print) 2071-2227, ISSN (online) 2223-2362.
- 11 **Лысенко, К. С.** Дослідження процесів тепло- та вологопереносу в криогенно-гравійному фільтрі під час його промерзання та розтавлення [Текст] / **К. С. Лысенко** // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка. – 2012. – Вып. 16, Т. 1. – С. 122–127. – ISSN 2312-2897.

## Bibliography (transliterated)

- 1 **Bashkatov, A. D.** (2003), *Progressivnyie tehnologii sooruzheniya skvazhin [Advanced technologies of wells construction]*, Nedra-Biznestsentr publ., Moscow, Russian, ISBN 5-8365-0153-X.
- 2 **Kozhevnikov, A. O. and Sudakov, A. K.** (2010), "Klassifikatsiya sposobov sozdaniya graviynyih filtrov [Classification of ways to create a gravel filter]", *Scientific Bulletin of national mining university*, no. 9–10, pp. 70–74, ISSN (print) 2071-2227, ISSN (online) 2223-2362.
- 3 **Kozhevnikov, A. O., Kamishatskiy, O. F., Leksikov, O. A. and Sudakova, D. A.** (2010), "Tehnologiya vivotovleniya blochnogo kriogenno-graviynogo filtra burovyih sverdrovin [Manufacturing technology cryogenic block-gravel filter wells]", *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu. Ser.: Girnicno-geologichna*, issue 14(181). pp. 83–86, ISSN 1996-1588, ISSN 1680-0044.
- 4 **Kozhevnikov, A. A., Sudakov, A. K. and Grinyak, A. A.** (2008), "Graviynyie filtryi s ispolzovaniem efekta dvuhfaznogo inversnogo perehoda agregatnogo sostoyaniya vyazhushchego veshchestva [Gravel filters using the inverse effect of the two-phase transition state of aggregation of binder]", *Porodora-zrushayuschiy i metalloobrabatyvayuschiy instrument – tehnika, tehnologiya ego izgotovleniya i primeneniya: Sbornik nauchnyih trudov.*, issue 11, pp. 84–88.
- 5 **Permyakov, P. P.** (1989), *Identifikatsiya parametrov matematicheskoy modeli teplovlagopere-nosa v merzlyih gruntah [Identification of the parameters of the mathematical model of heat moisture transfer in frozen soils]*, Nauka publ., Novosibirsk, Russia.
- 6 **Prizhodko A. A. and Alekseenko S. V.** (2001), "Chislennoe modelirovanie protsessov fazovyih perehodov poristyih sred na osnove resheniya zadachi Stefana i metoda effektivnoy teploemkosti [Numerical modeling of phase transitions of porous media based on the solution of the Stefan problem and the effective specific

- heat]", *Bulletin of Dnepropetrovsk University. Series: Mechanics*, vol. 1, issue 5, pp. 117–125, ISSN 2312-2897.
- 7 **Lykov, A. V.** (1968), *Teoriya sushki [Theory of drying]*. Energiya publ., Moscow, Russian.
  - 8 **Nikitenko, N. I., Snezhkin, Yu. F. and Sorokovaya, N. N.** (2003), "Dinamika protsessov tepломассопереноса, fazovyih prevrascheniy i usadki pri obezvozhivanii kolloidnyih kapillyarno-poristyih materialov [Dynamics of heat and mass transfer, phase changes and shrinkage during dehydration of colloidal capillary-porous materials]", *Industrial heat engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 56–66.
  - 9 **Dreus, A. Yu., Kozhevnikov, A. A., Lysenko, K. Ye., Sudakov, A. K.** (2010), "Matematicheskoe modelirovanie teplovyih protsessov v graviynyih filtrah gidrogeologicheskikh skvazhin [Mathematical modeling of thermal processes in the gravel filters of water wells]", *DAN Ukraine. Ser.: Nauki pro Zemlyu*, no. 9, pp. 98–102, ISSN 1025-6415.
  - 10 **Kozhevnikov, A. O., Sudakov, A. K., Dreus, A. Yu., Lysenko, K. Ye.** (2013), "Issledovanie teploperenosa v kriogenno-graviynom filtre pri ego transportirovke po stvolu skvazhinyi [Study of heat transfer in cryogenic gravel filter during its transportation along a drillhole]", *Scientific Bulletin of national mining university*, no. 6, pp. 49–54, ISSN (print) 2071-2227, ISSN (online) 2223-2362.
  - 11 **Lysenko, K. Ye.** (2012), "Doslidzhennya protsesiv teplo- ta vologoperenosa v kriogenno-graviynomu filtri pid chas yogo promerzannya ta rozteplennya [Investigation of heat and mass transfer in the cryogenically-gravel filter during its phase transformations]", *Bulletin of Dnepropetrovsk University, series: Mechanics*, vol. 1, issue 16, pp. 122–127, ISSN 2312-2897.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Лисенко Катерина Євгенівна** – кандидат технічних наук, Дніпропетровський національний університет ім. Олеса Гончара, доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу; м. Дніпропетровськ, Україна; e-mail: kotsarenko@ua.fm.

**Lysenko Katerina** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Associate Professor at the Department of Fluid Mechanics and Energy and Mass Transfer; Dnipropetrovsk, Ukraine.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Лисенко, К. Є.** Дослідження процесів тепло- та масопереносу в криогенно-гравійному фільтрі [Текст] / **К. Є. Лисенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 142–147. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.21.

*Please cite this article as:*

**Lysenko, K.** (2016), "Research of heat and mass transfer processes in cryogenically-gravel filter", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 142–147, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.21.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Лысенко, Е. Е.** Исследование процессов тепло- и массопереноса в криогенно-гравийном фильтре [Текст] / **Е. Е. Лысенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 142–147. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.21.

**АННОТАЦИЯ** Рассматривается процесс промерзания влажной дисперсной среды криогенно-гравийного фильтра. Предложена математическая модель и численная методика расчёта параметров фильтра. Определены эффективные режимы изготовления гравийных фильтров при криогенном способе заморозки. Проведено исследование промерзания гравийного фильтра и определена зависимость температуры фильтра, влажности, времени промерзания от условий и способа заморозки. Результаты исследования представляют интерес при определении временных характеристик замораживания криогенно-гравийных фильтров, и позволяют прогнозировать их эксплуатационные параметры при оборудовании гидрогеологических скважин.

**Ключевые слова:** гравийный фильтр, криогенная технология, дисперсная влажная среда, фазовые превращения.

Надійшла (received) 15.03.2016