

6. Witt-Doerring, Y., Pastusek, P., Lacey, A., Barajas, P., Bergeron, M., Clayton, D., & Sowers, S. (2023). Drilling dysfunction demystified using in-bit strain sensors. In *SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition*. SPE.
7. Dreus, A., Lysenko, K., Kozhevnykov, A., & Liu, B. (2017). Modeling hydrodynamics of the flushing fluid intermittent flow in the hydraulic system of the diamond bit. *Mining of Mineral Deposits*, 11(2), 84–90.
8. Hussain, W., Ali, M., Sadaf, R., et al. (2024). Advanced AI approach for enhanced predictive modeling in reservoir characterization within complex geological environments. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(4), 5043–5061.
9. Constantinides, Y., Liapis, S., Spencer, D., Islam, M., Skaugset, K., Batra, A., & Baarholm, R. (2015). Full scale fairing qualification tests. In *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Volume 2: CFD and VIV*. V002T08A065. ASME.

УДК 622.233:551.49

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-67-74

А. К. Судаков¹, А. Ю. Дреус², доктори технічних наук,
Д. І. Побідинський¹, аспірант

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро,
E-mail: sudakovu@ukr.net, Pobidynskiy.D.I@npti.one

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
пр. Науки, 72, 49045, м. Дніпро, E-mail: dreus.a@dnu.dp.ua

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛО- І ВОЛОГОПЕРЕНОСУ У ПОРИСТОМУ КРУПНОДИСПЕРСНОМУ СЕРЕДОВИЩІ КРІОГЕННО-ГРАВІЙНОГО ЕЛЕМЕНТА ФІЛЬТРА ЗА НАЯВНОСТІ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ

Метою роботи є розвиток теорії для підвищення ефективності технології обладнання бурових свердловин гравійними фільтрами. Це досягається шляхом попереднього омонолічування гравійного матеріалу на денній поверхні в блоки та подальшого їхнього розомонолічування в призабійній зоні свердловини. Процес розомонолічування відбувається за рахунок використання ефекту інверсного двофазного переходу агрегатного стану мінералов'язучої речовини на водній основі.

Дослідження ґрунтується на теоретичному аналізі тепло- та вологопереносу в пористій крупнодисперсній водонасиченій кріогенно-гравійній системі фільтра за наявності фазових переходів. Використовуються математичні моделі, зокрема задачі Стефана, для опису закономірностей перенесення тепла в пористому водонасиченому тілі.

Робота поглиблює розуміння теплофізичних та масообмінних характеристик пористих водонасичених матеріалів при низьких температурах та у присутності фазових переходів. Встановлено залежності теплофізичних властивостей (теплоємність, теплопровідність) від температури, що враховують наявність зв'язаної та вільної води, а також фазових перетворень. Це дозволяє більш точно моделювати поведінку кріогенно-гравійних фільтрів.

Запропонована ідея використання ефекту інверсного двофазного переходу агрегатного стану мінералов'язучої речовини на водній основі під періодичним впливом від'ємних і позитивних температур має потенціал для розробки нових технологій виготовлення високоякісних гравійних фільтрів на денній поверхні. Це може вирішити проблему утворення порожнин у гравійних обсыпках, що призводить до запісочування свердловин та виходу з ладу обладнання.

Ключові слова: тепло-вологоперенос, крупнодисперсне середовище, гравійний фільтр, фазовий перехід

Постановка проблеми

Якість свердловини, що споруджується, та її експлуатаційні характеристики визначаються комплексом технологічних робіт, проведених на заключному етапі її будівництва, який включає обладнання фільтром водоприймаючої частини свердловини.

Особливу складність представляє обладнання гравійними фільтрами водоприймаючої частини свердловини, водоносні горизонти яких представлені дрібнозернистими, тонкозернистими та пилюватими пісками.

Раціональний спосіб створення гравійного фільтра в свердловині визначається необхідністю отримання обсіпання високої якості із заданими параметрами за певних умов проведення робіт і за мінімальних витрат. Різноманітність природних гірничо-геологічних та гідрогеологічних факторів, а також конструкцій свердловин та їх призначень сприяла розробці принципово різних способів створення гравійних фільтрів, кожен з яких має свої переваги, недоліки та раціональні галузі застосування.

Як показано в попередніх роботах [1, 2], підвищенню якості гравійних обсіпок приділяло значну увагу багато вчених. Однак і досі не існує надійної технології створення гравійного фільтра з якісним гравійним обсіпанням. Технології їх створення мають низку суттєвих недоліків. Одним із серйозних недоліків є утворення зяючих порожнин у гравійному обсіпанні, що неминуче спричиняє піскування свердловини і може призвести до виходу з ладу обладнання та її ліквідації.

Практика показує, що якісне гравійне обсіпання можливо створити тільки на денній поверхні за умови візуального контролю та використання правильно підібраного, ретельно просіяного і добре окатаного гравійного матеріалу.

Для вирішення цієї проблеми необхідно вести пошук нових технологій створення гравійних фільтрів на денній поверхні, заснованих на інших фізичних процесах та в'язучих матеріалах. Одним із перспективних напрямів є технологія виготовлення гравійних фільтрів на денній поверхні, що базується на використанні ефекту двофазного інверсного переходу агрегатного стану в'язучої речовини.

У даному контексті ідея даної роботи полягає у використанні ефекту інверсного двофазного переходу агрегатного стану мінералов'язучої речовини на водній основі під періодичним впливом негативних і позитивних температур.

Метою роботи є розвиток теоретичних основ для підвищення ефективності технології обладнання бурових свердловин гравійними фільтрами. Це досягається шляхом попереднього омонолічування гравійного матеріалу на денній поверхні в блоки та подальшого їхнього розомонолічування в привибійній зоні свердловини.

Виклад основного матеріалу

З фізичної точки зору, елемент кріогенно-гравійного фільтра є крупнодисперсним водонасиченим середовищем. Основою теоретичних досліджень заморожування кріогенно-гравійного елемента (КГЕ) фільтра є опис закономірностей теплопереносу у пористому водонасиченому тілі за наявності фазового переходу речовини.

Клас завдань, у яких речовина зазнає фазового переходу з виділенням чи поглинанням тепла, називають завданнями Стефана [3]. Особливістю таких завдань є наявність поверхні поділу двох фаз, причому закон руху фронту фазового переходу невідомий. Тепло- та масообмінні характеристики фаз, розділених межею фазового переходу, відрізняються.

Насамперед слід зупинитися на питанні впливу пористої структури на закономірності перенесення тепла та вологи. Дисперсне водонасичене середовище є багатокомпонентною і багатозафазною системою, що складається з гірської породи – гравію, і наповнювача – води в чистому вигляді або з домішками.

Гравій відносять до крупнодисперсних нецементованих осадових порід. Основною характеристикою є гранулометричний склад і пов'язані з ним щільність, об'ємна маса і пористість.

Залежно від зовнішніх умов у поровому просторі матеріалу може перебувати вода і повітря. Вода залежно від зовнішніх умов може перебувати у трьох агрегатних станах: рідкому, твердому та газоподібному. Вода в рідкій фазі поділяється на пов'язану (під дією енергії зв'язку) та вільну. У свою чергу пов'язана волога в залежності від структури та текстури матеріалу ділиться на слабо – і сильно пов'язану. Особливий інтерес для визначення теплофізичних та масообмінних характеристик пористих водонасичених матеріалів становлять стан і кількість зв'язаної води, адже її фазовий перехід відбувається в негативному діапазоні температур $T < 273$ К, а не за температури $T = 273$ К, як у вільної води [4].

Теоретичним дослідженням тепло- та масопереносу в дисперсних середовищах за наявності фазових переходів присвячено низку робіт. Зокрема, математичні постановки завдання Стефана та методи її вирішення представлені у роботах [5–7]. З аналізу робіт можна дійти висновку, що основними методами вирішення завдань Стефана в дисперсних середовищах є чисельні методи. Найбільш широко для вирішення задач з фазовими переходами на практиці використовують метод наскрізного розрахунку, метод прямих та метод економічних кінцево-різницевого схем. Аналітичне рішення задачі Стефана можливе в обмеженій кількості випадків [8, 9], які призначені для вирішення окремих випадків. Так, у [10] автором представлено аналітичне рішення задачі заморожування ґрунту.

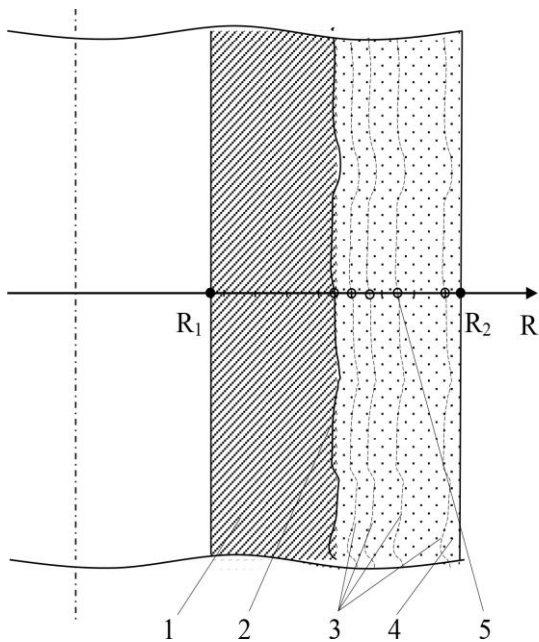


Рис. 1. Схема до чисельного дослідження задачі методом явного виділення фронту фазового переходу: 1 – заморожений фільтр; 2 – фронт фазового переходу; 3 – попереднє розташування фронту; 4 – розморожений фільтр; 5 – точки фіксації фазового переходу

На сьогоднішній день найефективнішим інструментом розв'язання задач типу (1)–(2) є чисельні методи. Серед них можна виділити два основних підходи до чисельного дослідження.

1. Метод явного виділення фронту фазового переходу. З фізичної точки зору метод цей полягає у покроковому визначенні фронту фазового перетворення в'язучої речовини, що знаходиться в пористому крупнодисперсному середовищі. Розглядається модель необмеженого

Складність теоретичних досліджень замерзання-розтавання криогенно-гравійного фільтру (КГФ) зумовлена необхідністю врахування фізичних особливостей пористої структури матеріалу КГФ та наявністю фазових переходів.

Для системи гірська порода – рідина – лід математична модель тепло- та вологообміну у загальному вигляді являє собою систему диференціальних рівнянь нестационарного теплопереносу [11]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = k_{11} \nabla^2 T + k_{12} \nabla^2 U, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = k_{21} \nabla^2 U + k_{22} \nabla^2 T,$$

Де T – температура; U – вологоємність; τ – час; k – коефіцієнти дифузії,

$$k_{11} = a + (1-i)k\delta \frac{l}{c}, \quad k_{12} = (1-i)k \frac{l}{c}, \quad (2)$$

$$k_{21} = k(1-i), \quad k_{22} = (1-i)k\delta,$$

де a – коефіцієнт температуропровідності; i – льодистість; δ – термоградієнтний коефіцієнт; l – прихована теплота фазового переходу вода – лід; c – ізобарна теплоємність.

порожнистого циліндра КГЕ фільтра (рис. 1) у радіальному напрямку, обмеженого внутрішнім R_1 та зовнішнім R_2 радіусами. При цьому його довжина є несуттєвою.

У цьому методі при чисельній реалізації використовується рухома межа поділу фаз, (фронт фазового переходу), на якій відбувається стрибок теплофізичних властивостей. Моделювання процесу фазового переходу здійснюється шляхом встановлення умов Стефана на цій межі. Дані умови відображають виконання закону збереження енергії та мають вигляд:

$$q_1 - q_2 = \rho L \frac{d\xi}{d\tau} \quad (3)$$

де q_1 – тепловий потік у мерзлій області; q_2 – тепловий потік у талій області; L – прихована теплота фазового переходу, що виділяється (або поглинається) під час замерзання/розтавлення; ξ – межа фазового перетворення.

Друга умова описує безперервність температури.

Нехай фазовий перехід вільної води порового простору відбувається за нормальної температури $T_f = 273$ К. Тоді зміна агрегатного стану відбувається на рухомій межі поділу фаз $\xi(\tau)$. Тоді температурне поле у мерзлій (1-й) та талій (2-й) фазах описується диференціальними рівняннями виду:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad R_1 < r < \xi(\tau), \tau > 0, \quad (4)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad \xi(\tau) < r < R_2, \tau > 0.$$

При цьому вологоперенесення має місце лише в талій зоні

$$\frac{\partial U_2}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial U_2}{\partial r} \right). \quad (5)$$

На рухомому кордоні поділу фаз $\xi(\tau)$ виконується умова Стефана для теплових потоків

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{\xi^-} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{\xi^+} - l \rho k \frac{\partial \omega_2}{\partial r} \Big|_{\xi^+} = l \rho \frac{\partial \xi}{\partial \tau}, \quad (6)$$

а для температури – умова безперервності

$$T_1(\xi^-, \tau) = T_2(\xi^+, \tau) = T_f. \quad (7)$$

Для вологості на рухомій межі поділу фаз виконується умова

$$U(\xi^+) = U_f = const.$$

В (1)–(7) ρ – щільність; λ – коефіцієнт теплопровідності; T_f – постійна температура фазового переходу.

Теплофізичні характеристики визначаються

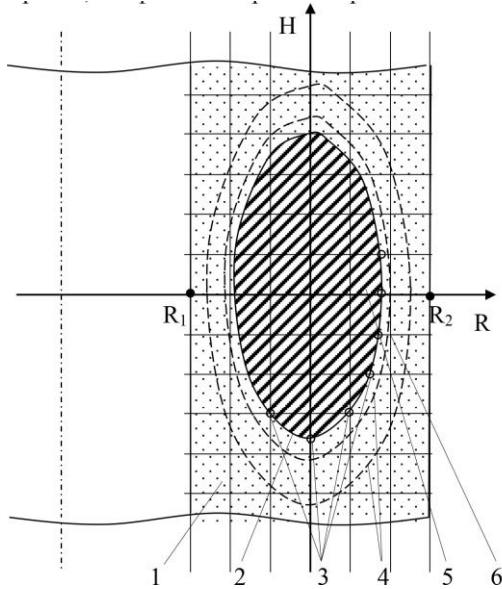


Рис. 2. Схема до чисельного дослідження задачі методом ефективної теплоємності: 1 – розморожений фільтр; 2 – фронт фазового переходу; 3 – точки фіксації фазового переходу; 4 – попереднє розташування фронту; 5 – заморожений фільтр; 6 – координатна сітка

Цей підхід є досить ефективним для крупнодисперсних середовищ, коли фазовий перехід відбувається практично за постійної температури. Однак даний метод має низку обмежень при обчислювальній реалізації. По-перше, закон руху межі фазового переходу наперед невідомий. По-друге, у міру руху межі фазового перетворення змінюються розміри талої та мерзлої зон, що потребує перебудови розрахункової сітки на кожному кроці. Це значно ускладнює алгоритм та потребує додаткових обчислювальних ресурсів. У разі двовимірної розрахункової області вимога задоволення збігу фронту фазового переходу з вузлами розрахункової сітки призводить до значного ускладнення алгоритму, додаткових припущень і зниження точності розрахунку.

2. *Метод ефективної теплоємності.* Метод ґрунтується на використанні поняття ефективної теплоємності середовища. У цьому випадку в двовимірній області вводиться постійна розрахункова сітка (рис. 2), фазовий перехід враховується не у вигляді граничної умови, а безпосередньо в рівнянні теплопереносу і зміні теплофізичних характеристик мерзлої та талої областей шляхом введення ефективних коефіцієнтів, що змінюються. При цьому немає гарантії, що фазовий перехід потрапить точно до розрахункового вузла сітки. При заморожуванні – розтапленні дисперсного середовища фазовий перехід порової вологи відбувається у діапазоні негативних температур. Математична модель теплообміну у водонасиченому дисперсному середовищі в діапазоні температур матиме вигляд

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + m\rho_1(T)\frac{\partial i}{\partial \tau}, \quad (11)$$

$$R_1 < r < R_2, \tau > 0.$$

Враховуючи, що $\frac{\partial i}{\partial \tau} = \frac{\partial i}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}$ рівняння (6) можна записати як

$$c(T) = \begin{cases} c_1, T \leq T_f - \delta; \\ \frac{(c_1 + c_2)}{2} + l \frac{U_0 - U_{ps}}{2\delta}, & T_f - \delta \leq T \leq T_f + \delta; \\ c_2, T_f + \delta \leq T, \end{cases} \quad (8)$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, T \leq T_f - \delta; \\ \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1) \frac{T - T_f + \delta}{2\delta}; \\ \lambda_2, T_f + \delta \leq T, \end{cases} \quad (9)$$

де δ – параметр згладжування моделі; U_{ps} – кількість міцно пов'язаної вологи.

Коефіцієнти теплопровідності для мерзлої та талої фаз визначаються як

$$\lambda_{1,2} = n_{1,2}(\rho \cdot 10^{-3} + 0,1U_0 - 1,1) - 0,1U_0, \quad (10)$$

де $n_{1,2}$ – коефіцієнт, який залежить від дисперсності середовища.

Перевагами даної математичної моделі є визначення з високою точністю межі поділу фаз.

$$c_{ef}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (11)$$

В (11) $c_{ef}(T)$ – ефективна теплоємність, задана формулою

$$c_{ef} = c_{sk} + c_1 U + (c_2 - c_1) U_{mv}(T) + l \frac{\partial U_{mv}(T)}{\partial T}, \quad (12)$$

де $U_{mv}(T)$ – функція незамерзлої води [12, 13].

Функція льодистості $i(T)$ істотно залежить від пористості (гранулометричного складу) середовища і визначається як відношення маси льоду до маси всієї водно-льодової суміші, яка міститься в поровому просторі.

Для піску, який є крупнодисперсним середовищем, залежність $i = i(T)$ може бути описана функцією, наведеною на рис. 3. Із графіка видно, що при T_H льодистість $i(T_H) = 0$, а при T_K льодистість $i(T_K) \rightarrow 1$.

Висновки

На сьогоднішній день найефективнішим інструментом розв'язання задач типу (1)–(2) є чисельні методи. Можна виділити два основні підходи:

- при вирішенні одновимірних завдань використовують чисельні методи з явним виділенням фронту фазового переходу;

- для вирішення багатовимірних завдань найбільш поширеним є метод ефективної теплоємності. Даний метод теоретичного дослідження тепло- та масопереносу в дисперсних середовищах та його модифікації дозволяють враховувати реальні особливості перебігу описаних вище фізичних процесів. Його застосування значно спрощує побудову обчислювального алгоритму. Тому в подальших дослідженнях доцільно використовувати саме метод ефективної теплоємності.

A. Sudakov¹, A. Dreus², D. Pobidynskyi¹

¹Dnipro University Technology, Ukraine

²Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

THEORETICAL STUDIES OF HEAT AND MOISTURE TRANSFER IN A POROUS COARSE-DISPERSED MEDIUM OF A CRYOGENIC-GRAVEL FILTER ELEMENT IN THE PRESENCE OF PHASE TRANSITIONS

The objective of this work is to advance the theory for enhancing the efficiency of gravel pack completion technology for oil and gas wells. This is achieved by pre-consolidating the gravel material into solid blocks at the surface and subsequently disaggregating them in the well's bottomhole zone. The disaggregation process is facilitated by utilizing the effect of an inverse, two-phase transition of the state of aggregation in a water-based mineral binder.

The research is based on a theoretical analysis of heat and mass transfer within a porous, coarse-grained, water-saturated, cryogenic-gravel filter system in the presence of phase transitions. Mathematical models, particularly Stefan problems, are employed to describe the principles of heat transfer in a porous, water-saturated medium.

This study deepens the understanding of the thermophysical and mass-exchange characteristics of porous, water-saturated materials at low temperatures and in the presence of phase transitions. Dependencies of thermophysical properties (heat capacity, thermal conductivity) on temperature have been established, accounting for the presence of bound and free water, as well as phase transformations. This enables more accurate modeling of the behavior of cryogenic-gravel filters.

The proposed concept of utilizing the inverse, two-phase transition of the state of aggregation in a water-based mineral binder under the cyclic influence of sub-zero and positive temperatures holds potential for developing new technologies to manufacture high-quality gravel filters at the surface. This approach could solve the problem of void formation in gravel packs, which leads to well sanding and equipment failure.

Key words: heat and mass transfer, coarse-grained medium, gravel pack, phase transition

Надійшла 13.09.25

Література

1. Судаков А.К. Наукові основи технології обладнання бурових свердловин криогенногравійними фільтрами: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.15.10. Дніпропетровськ, 2014. 412 с.
2. Кожевников А.О., Судаков А.К. Криогенно-гравійні фільтри свердловин. Дніпропетровськ: Літограф, 2014. 305 с.
3. Stephan, K. *Heat transfer in condensation and boiling*. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 1992. 325 p.
4. Standnes, D. C., Fotland, P. A thermodynamic analysis of the impact of temperature on the capillary pressure in porous media. *Water Resources Research*. 2021. N 57(8). e2021WR029887.
5. Mobedi, M., Hooman, K. *Advances of Heat Transfer in Porous Media*. MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023
6. Li, Z. Z., Ding, Y. D., Liao, Q., Cheng, M., Zhu, X. An approach based on the porous media model for numerical simulation of 3D finned-tubes heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. N 173. 121226.
7. Xiong, Q., Siavashi, M., Doranehgard, M.H. *et al.* Recent developments of advanced numerical heat transfer in porous media. *J Therm Anal Calorim*. 2020. N 141, P. 1489–1491.
8. Xu, M., Akhtar, S., Zueter, A. F., Alzoubi, M. A., Sushama, L., Sasmito, A. P. Asymptotic analysis of a two-phase Stefan problem in annulus: Application to outward solidification in phase change materials. *Applied Mathematics and Computation*, 2021. N 408. 126343.
9. Huang X., Rudolph D. A hybrid analytical-numerical technique for solving soil temperature during the freezing process. *Advances in Water Resources*. 2022. N 162. 104163.
10. Bronfenbrener L., Bronfenbrener R., Alafenish A. A model of soils freezing with allowance for freezing zone, Chemical Engineering and Processing. *Process Intensification*. 2013. N 73. P. 38–49.
11. Hu G., Zhao L., Zhu X., Wu X., Wu T., Li R., Xie C., Hao J. Review of algorithms and parameterizations to determine unfrozen water content in frozen soil. *Geoderma*. 2020. N 368. 114277.
12. Кожевников А. О., Судаков А. К., Дреус А. Ю. Наукові основи інноваційної технології обладнання бурових свердловин криогенно-гравійними фільтрами. *Наука та інновації*. 2015. Т. 11, № 3. С. 23–38.
13. Kozhevnikov A.A., Sudakov A.K., Dreus A.J., Lysenko, K. Ye. Study of heat transfer in cryogenic gravel filter during its transportation along a drillhole. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2014. N 6. P. 49–54.

Надійшла 13.09.2025

References

1. Sudakov, A.K. (2014). *Naukovi osnovy tekhnolohiyi obladnannya burovykh sverdlovykh kriohenno-hravyynymy filtramy [Scientific basis of the technology of drilling well equipment with cryogenic gravel filters]*. [Doctor's dissertation], Dnipropetrovsk [in Ukrainian].

2. Kozhevnikov, A.O., & Sudakov, A.K. (2014). *Kriohenno-hraviini filtry sverdlovyh* [Cryogenic-gravel filters of wells]. Litohraf [in Ukrainian].
3. Stephan, K. (1992). *Heat transfer in condensation and boiling*. Springer-Verlag.
4. Standnes, D. C., Fotland, P. A. (2021). Thermodynamic analysis of the impact of temperature on the capillary pressure in porous media. *Water Resources Research*, 57(8), e2021WR029887.
5. Mobedi, M., Hooman, K. (2023). *Advances of Heat Transfer in Porous Media*. MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute
6. Li, Z. Z., Ding, Y. D., Liao, Q., et al. (2021). An approach based on the porous media model for numerical simulation of 3D finned-tubes heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 173, 121226.
7. Xiong, Q., Siavashi, M., Doranehgard, M.H. et al. (2020). Recent developments of advanced numerical heat transfer in porous media. *J Therm Anal Calorim*, 141, 1489–1491.
8. Xu, M., Akhtar, S., Zueter, A. F., et al. (2021). Asymptotic analysis of a two-phase Stefan problem in annulus: Application to outward solidification in phase change materials. *Applied Mathematics and Computation*, 408, 126343.
9. Huang, X., Rudolph, D. (2022). A hybrid analytical-numerical technique for solving soil temperature during the freezing process. *Advances in Water Resources*, 162, 104163.
10. Bronfenbrener, L., Bronfenbrener, R., Alafenish, A. A. (2013). Model of soils freezing with allowance for freezing zone, Chemical Engineering and Processing. *Process Intensification*, 73, 38–49.
11. Hu, G., Zhao, L., Zhu, X., et al. (2020). Review of algorithms and parameterizations to determine unfrozen water content in frozen soil. *Geoderma*, 368, 114277.
12. Kozhevnikov, A.O., Sudakov, A.K., & Dreus, O.Y. (2015). Naukovi osnovy innovatsiinoi tekhnologii obladnannia burovykh sverdlovyh kriohenno-hraviinymy filtramy [Scientific basis of innovative technology of drilling wells equipment with cryogenic-gravel filters]. *Nauka ta innovatsii – Science and innovation*, 11(3), 23–38 [in Ukrainian].
13. Kozhevnikov A.A., Sudakov A.K., Dreus A.J., Lysenko, K. Ye. (2014). Study of heat transfer in cryogenic gravel filter during its transportation along a drillhole. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – . Scientific Bulletin of the National Mining University*, (6), 49–54.

УДК 621.642.3:665.6/.7:502.3

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-74-88

A. K. Sudakov, Doctor of Technical Sciences, **O. A. Pashchenko**, **V. O. Rastsvietaiev**,
Candidates of Technical Sciences

*Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, 49005, Ukraine,
e-mail: rastsvietaiev.v.o@nmu.one*

INNOVATIVE APPROACHES TO THE DESIGN AND OPERATION OF TANKS FOR GAS AND OIL TRANSPORTATION

The transportation of gas and oil is a critical component of the global energy supply chain, necessitating advanced tank designs that prioritize safety, efficiency, and environmental sustainability. This article explores innovative approaches to the design, production, and operation of tanks used for transporting hydrocarbons, including natural gas, liquefied natural gas (LNG), hydrogen, and various oil fractions. The study addresses the increasing demand for energy resources, driven by global consumption trends, and the