

К. Є. Лисенко

Дніпропетровський національний університет ім. Олеса Гончара

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛО- ТА ВОЛОГОПЕРЕНОСУ В КРИОГЕННО-ГРАВІЙНОМУ ФІЛЬТРІ ПІД ЧАС ЙОГО ПРОМЕРЗАННЯ ТА РОЗТЕПЛЕННЯ

Проведені дослідження процесів тепло- та вологопереносу за наявності фазових перетворень в'язучої речовини для визначення технологічних параметрів виготовлення та експлуатації криогенно-гравійних фільтрів. Розглянуті теплофізичні та масообмінні характеристики дисперсного середовища, з якого складається фільтр. Показано практичну значимість отриманих результатів.

Ключові слова: криогенно-гравійний фільтр, дисперсне середовище, в'язуча речовина, промерзання, розтеплення.

Проведены исследования процессов тепло- и влагопереноса при наличии фазовых превращений связывающего вещества для определения технологических параметров изготовления и эксплуатации криогенно-гравийных фильтров. Рассмотрены теплофизические и массообменные характеристики дисперсной среды, из которой состоит фильтр. Показана практическая значимость результатов.

Ключевые слова: криогенно-гравийный фильтр, дисперсная среда, связывающее вещество, промерзание, растепление.

A study of heat and moisture transfer with phase transformations of the binder to determine the technological parameters of production and operation of cryogenically-gravel filters. Thermophysical and mass transfer characteristics of the dispersion medium, which consists of a filter. Demonstrated the utility of the results.

Key words: cryogenically-gravel filter, disperse medium, adhesive, the freezing, defrosting.

Актуальність проблеми. Гравійний фільтр – конструкція, що встановлюється до прифільтрової зони бурової свердловини для підвищення її фільтраційних характеристик. Використання гравійних фільтрів забезпечує ефективну роботу свердловини та сприяє підвищенню якісних характеристик видобутої рідини [1]. У [4] запропоновано класифікацію способів виготовлення гравійних фільтрів залежно від конструктивних особливостей бурової свердловини. З аналізу переваг та недоліків кожного виду гравійних фільтрів можна зробити висновок, що теперішнього часу більш перспективним у вітчизняній та зарубіжній практиці є використання опускних (таких, що виготовляються на поверхні свердловини) гравійних фільтрів. Зауважимо, що основним недоліком виготовлення опускних фільтрів є використання в якості середовища, що зміцнює корпус, смол та клеїв, внаслідок чого погіршуються фільтраційні характеристики. Вирішення цієї проблеми запропоновано на кафедрі техніки розвідки родовищ корисних копалин ДВНЗ «Національний гірничий університет», де запропонована нова технологія виготовлення опускних гравійних фільтрів [5]. Основною ідеєю запропонованої технології є використання води або її розчину як в'язучої речовини, а необхідна міцність конструкції під час виготовлення фільтра досягається за рахунок фазового перетворення в'язучої рідини «вода-лід».

Навпаки, при встановленні такого фільтра у робоче положення відбувається зворотне фазове перетворення в'язучої рідини «лід-вода», при цьому фільтраційні характеристики фільтру задовольняють технологічним вимогам. Очевидно, що для визначення технологічних параметрів виготовлення та експлуатації криогенно-гравійних фільтрів (далі КГФ) (глибина промерзання, час початку розтеплення) необхідно досліджувати процеси тепло- та масообміну в середовищі фільтра.

Дослідження таких процесів може бути виконано з використанням методів математичного моделювання, оскільки їх використання на сьогоднішній день досить добре вивчено і є найбільш прийнятним для розв'язання цього класу задач.

Метою даної роботи є проведення дослідження процесів тепло- та вологопереносу в КГФ при його промерзанні та розтапленні, і визначення технологічних параметрів виготовлення та експлуатації такого фільтра.

Математична модель. КГФ представляє собою дисперсне багатофазне середовище, яке в загальному випадку складається з води, льоду, повітря і скелету (гравій). Складністю побудови математичної моделі промерзання-розтаплення КГФ є необхідність врахування теплофізичних та масообмінних характеристик дисперсного середовища фільтра. Математичному моделюванню теплообміну з фазовими перетвореннями у дисперсних матеріалах присвячено ряд робіт [6; 8; 9; 10] та інші, в яких практичний інтерес представляє дослідження промерзання та усадки ґрунтів і сушка капілярно-пористих матеріалів. Проте, кілька специфічних аспектів, які стосуються саме криогенно-гравійних фільтрів, у відомих математичних моделях не розглядається.

Математична модель теплопереносу при промерзанні та розтапленні КГФ без урахування вологопереносу була побудована у [2], де також представлені результати розрахунку у вигляді температурних полів та показано адекватність даної моделі. Моделювання переносу тепла та вологи під час промерзання в крупнодисперсному водонасиченому середовищі проведено в [3]. У даній роботі будемо досліджувати теплоперенос спільно з переносом вологи у КГФ при його розтапленні та промерзанні.

Важливим моментом при моделюванні промерзання КГФ є використання двох способів заморожування фільтра, що обумовлюється технологічними особливостями бурової свердловини. Залежно від глибини свердловини та зовнішніх умов застосовується або звичайне заморожування в морозильній камері (з кінцевою температурою фільтра до -50°C) або криогенне заморожування рідким азотом (кінцева температура фільтра до -100°C).

На рис. 1 зображено фото фільтра в готовому вигляді та модель КГФ, який представляє собою полий обмежений циліндр. За технологією виготовлення середовищем фільтра являється суміш гравію з водою. Переносом вологи за рахунок сили тяжіння та випаровуванням з поверхні фільтра знехтуємо. Враховуючи зв'язаність вологи в пористих матеріалах зі скелетом [6; 9], будемо вважати, що фазовий перехід вологи в порах відбувається в діапазоні від'ємних температур $[T_n; T_k]$, де T_n – температура початку фазового переходу, T_k – температура кінця фазового переходу.

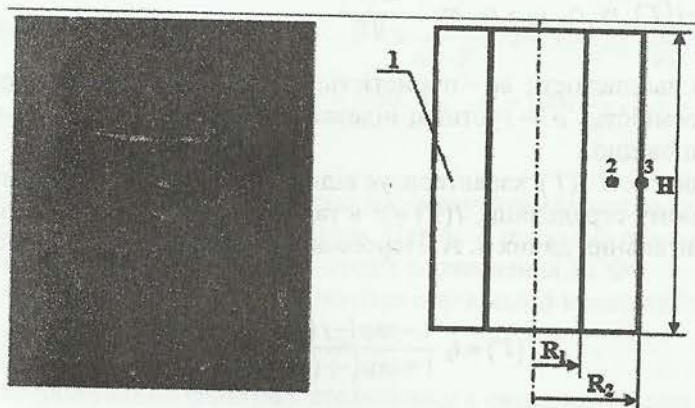


Рис. 1. Криогенно-гравійний фільтр:

а) фото КГФ у готовому вигляді; б) модель фільтра, де 1 – середовище фільтра

З математичної точки зору задача промерзання-розтеплення КГФ зводиться до вирішення двовимірної задачі розповсюдження теплоти та вологи при наявності фазового переходу вода-лід для дисперсного водонасиченого середовища [6; 8; 10].

Рівняння теплопереносу в КГФ за наявності фазового переходу сформулюємо з використанням методу ефективної теплоємності [6; 10]

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

$$\tau > 0, R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq z \leq H,$$

де c_{ef} – ефективна теплоємність дисперсного середовища; $\rho(T)$ – густина дисперсного середовища; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності КГФ; T – температура фільтру; τ – час; R_1, R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси фільтра відповідно; H – висота фільтра.

Початкову та граничні умови для (1) запишемо наступним чином:

$$T(x, z, 0) = T_0 = const,$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_s = \bar{\alpha}(T|_s - T_\infty),$$

де n – зовнішня нормаль до s -ої поверхні; $\bar{\alpha}$ – середній коефіцієнт тепловіддачі; $T|_s$ – температура s -ої поверхні; T_∞ – температура навколишнього середовища.

Середній коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha}$ у процесі промерзання КГФ визначається відповідно до одного з двох способів заморожування фільтра. У процесі експлуатації КГФ, згідно технології експлуатації КГФ, можливі три режими розтеплення фільтра:

- підготовчі роботи на повітрі, тоді коефіцієнт тепловіддачі визначається відповідно до умов вільної конвекції в необмеженому просторі;
- при нарощуванні бурильної колони фільтр знаходиться нерухомо у свердловині, навколишнім середовищем є вода у замкнутому просторі;
- спуск КГФ по стовбуру свердловини, теплообмін з навколишнім середовищем відповідає умовам вимушеної конвекції у замкнутому просторі.

Ефективна теплоємність дисперсного середовища $c_{ef}(T)$ є величиною адитивною [9; 10]

$$c_{ef}(T)\rho(T) = (1-m)\cdot c_{sk}\cdot\rho_{sk} + (1-i(T))\cdot m\cdot c_w\cdot\rho_w + i(T)\cdot m\cdot c_l\cdot\rho_l + \rho_l\cdot m\cdot l\cdot\frac{di(T)}{dT}, \quad (2)$$

де $i(T)$ – функція льодистості; m – пористість; l – питома теплота фазового переходу; c – теплоємність; ρ – густина; індекси sk, w, l відносяться до скелету, води та льоду, відповідно.

Функція льодистості $i(T)$ характеризує відношення маси льоду до маси всієї вологи в дисперсному середовищі, $i(T) = 0$ в талій зоні і $i(T) \rightarrow 1$ в мерзлій зоні. Згідно експериментальних даних З. А. Нерсесової [7], льодистість апроксимується виразом виду

$$i(T) = i_k \frac{1 - \exp(-\gamma(T - T_n))}{1 - \exp(-\gamma(T_k - T_n))}, \quad (3)$$

де i_k – значення льодистості при температурі T_k ; γ – коефіцієнт, який характеризує ступінь зв'язаності води зі скелетом у дисперсному середовищі.

Коефіцієнт теплопровідності для дисперсного середовища визначимо виразом

$$\lambda(T) = \lambda_m + (\lambda_t - \lambda_m) \cdot (1 - i(T)),$$

де λ_m, λ_t – коефіцієнти теплопровідності мерзлого та талого крупнодисперсного середовища, відповідно [9]

$$\lambda_m = 1,7 \cdot (\rho \cdot 10^{-3} + 0,1\omega_0 - 1,1) - 0,1\omega_0,$$

$$\lambda_t = 1,5 \cdot (\rho \cdot 10^{-3} + 0,1\omega_0 - 1,1) - 0,1\omega_0.$$

Рівняння вологопереносу в дисперсному водонасиченому середовищі КГФ запишемо у вигляді [4] з використанням фіктивного вологовмісту

$$\frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot k(T, \omega) \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T, \omega) \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial z} \right), \quad (4)$$

$$\tau > 0, R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq z \leq H,$$

де $\tilde{\omega}$ – фіктивний вологовміст; $k(T)$ – коефіцієнт дифузії для дисперсного середовища, який визначається в [3; 9].

Значення вологовмісту $\tilde{\omega}$ співпадає з реальним у талій зоні, а в зоні промерзання $\tilde{\omega}$ описує розподіл деякого фіктивного вологовмісту. Тоді реальне значення вологовмісту ω визначається виразом

$$\tilde{\omega} = (1 - i(T)) \cdot \omega.$$

Початкову та граничні умови для (4) запишемо у вигляді

$$\tilde{\omega}(x, y, 0) = \tilde{\omega}_0,$$

$$k(T, \omega) \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = k(T, \omega) \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = 0, \quad (5)$$

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

При розв'язанні поставленої задачі (1) – (5) можливо організувати обчислювальну процедуру без явного виділення фронту фазового переходу, що дає змогу розв'язувати задачу чисельним методом наскрізного розрахунку.

Результати розрахунку. Результати чисельного моделювання промерзання КГФ при заморожуванні в морозильній камері представлені на рис. 2. Розрахунки були проведені при наступних вхідних параметрах: $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $T_\infty = -20^\circ\text{C}$, $\omega_0 = 15\%$,

$$H = 200 \text{ мм}, R_1 = 55 \text{ мм}, R_2 = 90 \text{ мм}, \bar{\alpha} = 9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, l = 334 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, c_{sk} = 0,92 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$c_w = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, c_{sk} = 2,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \rho_{sk} = 1650 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \rho_w = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \rho_l = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, m = 0,3,$$

$$i_k = 0,98, \tau = 1 \text{ год}.$$

Процес розтеплення КГФ будемо досліджувати відповідно до технологічних особливостей розморожування фільтра. На рис. 3 показано динаміку зміни температури від часу відповідно до двох етапів розтеплення КГФ:

I. Розморожування фільтра на повітрі при вільній конвекції з вхідними параметрами $T_0 = -20^\circ\text{C}$, $T_\infty = 15^\circ\text{C}$, $\bar{\alpha} = 18 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

II. Розморожування фільтра у стоячій воді в свердловині при наступних вхідних параметрах задачі $T_0 = -40^\circ\text{C}$, $T_\infty = 5^\circ\text{C}$, $\bar{\alpha} = 186 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

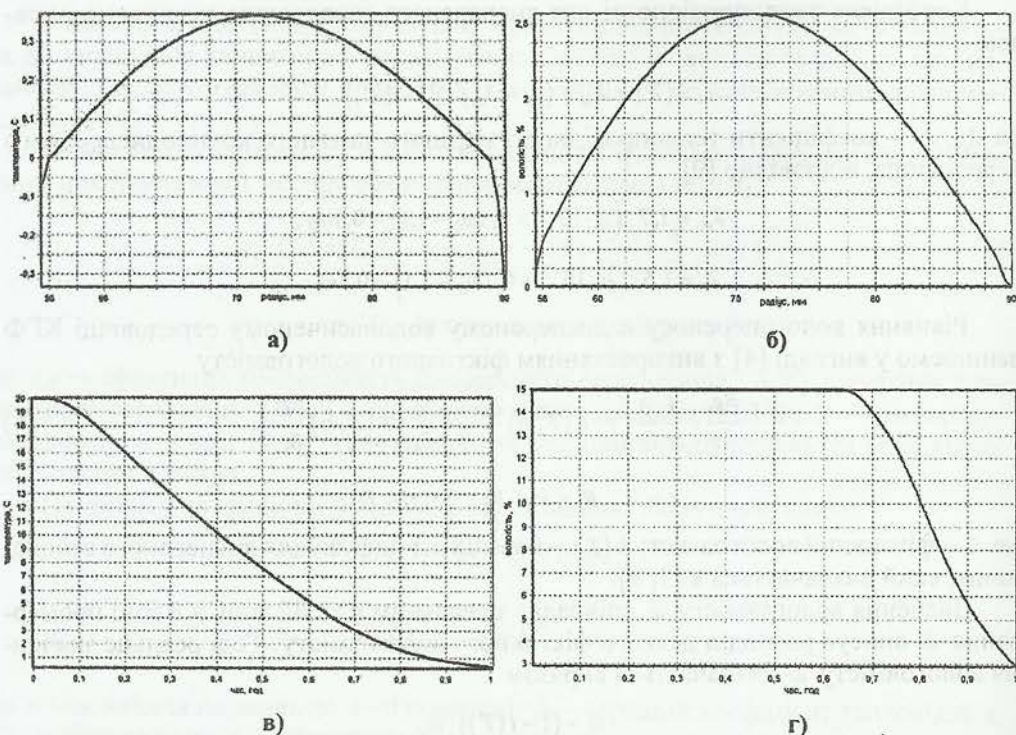


Рис. 2. Розподіл температури (а) та вологості (б) по радіусу фільтра в точці 2 (рис. 1 б), залежність температури від часу (в) та вологості від часу (г) у центрі фільтра через одну годину

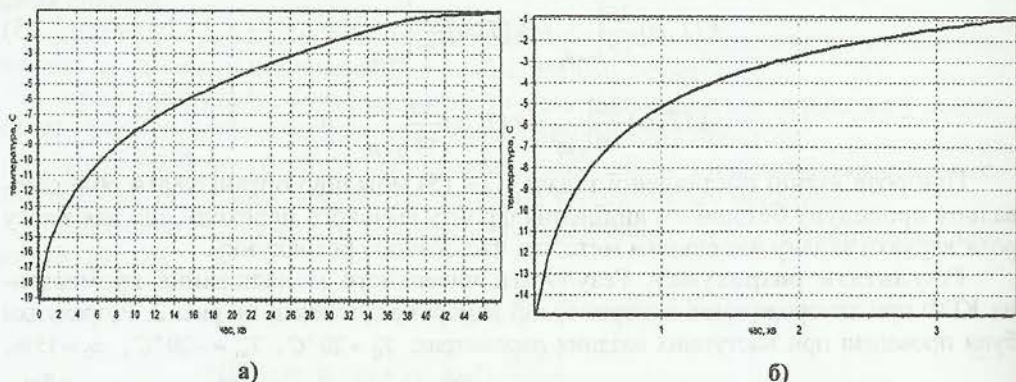


Рис. 3. Залежність температури від часу для I-го режиму розтавлення фільтра (а) та II-го режиму (б) у точці 3 (рис. 1 б)

Як видно з рис. 3, фазовий перехід «лід-вода» на поверхні КГФ при даних зовнішніх умовах для I-го режиму розтавлення починається через 48 хв, а для II-го режиму – через 3,5 хв після початку розморожування.

Процес розтавлення КГФ під час його спуску в свердловині відбувається значно динамічніше, що пояснюється наявністю вимушеної конвекції у замкнутому просторі. Як показують результати розрахунку, вже через декілька секунд на поверхні фільтра починається фазовий перехід, що може призвести до передчасного руйнування конструкції КГФ. Тому виникає необхідність використання криогенних технологій промерзання КГФ, зокрема, заморожування рідким азотом.

Висновки. У роботі проведено дослідження процесів тепло- та вологопереносу при промерзанні та розтавленні КГФ і представлено результати чисельно-

го дослідження даної задачі. Отримані результати використані при розробці ряду практичних рекомендацій щодо проектування та експлуатації КГФ.

Бібліографічні посилання

1. Башкатов А. Д. Прогрессивные технологии сооружения скважин / А. Д. Башкатов. – М., 2003. – 554 с. ил.
2. Дреус А. Ю. Математическое моделирование тепловых процессов в гравийных фильтрах гидрогеологических скважин / А. Ю. Дреус, А. А. Кожевников, Е. Е. Лысенко, А. К. Судаков // ДАН України. Серія: «Науки про Землю». – 2010. – № 9. – С. 98 – 102.
3. Дреус А. Ю. Математическая модель и алгоритм расчета тепловлагопереноса в промерзающей крупнодисперсной среде / А. Ю. Дреус, Е. Е. Лысенко // Системні технології. – 2011. – № 2(73). – С. 72 – 77.
4. Кожевников А. О. Классификация способов создания гравийных фильтров / А. О. Кожевников, А. К. Судаков // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 9 – 10. – С. 70 – 74.
5. Кожевников А. О. Технологія виготовлення блочного кріогенно-гравійного фільтра бурових свердловин / А. О. Кожевников, А. К. Судаков, О. Ф. Камишацький, О. А. Лексиков, Д. А. Судакова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна». – 2010. – Вип. 14 (181). – С. 83 – 86.
6. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М., 1968. – 472 с.
7. Нерсесова З. А. Изменение льдистости грунтов в зависимости от температуры / З. А. Нерсесова // ДАН СССР. – 1950. – Т. 75, № 6. – С. 845 – 846.
8. Никитенко Н. И. Динамика процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при обезвоживании коллоидных капиллярно-пористых материалов / Н. И. Никитенко, Ю. Ф. Снежкин, Н. Н. Сорокова // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 3. – С. 56 – 66.
9. Пермяков П. П. Идентификация параметров математической модели тепловлагопереноса в мерзлых грунтах / П. П. Пермяков. – Новосибирск, 1989. – 86 с.
10. Приходько А. А. «Численное моделирование процессов фазовых переходов пористых сред на основе решения задачи Стефана и метода эффективной теплоемкости» / А. А. Приходько, С. В. Алексеенко // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: «Механіка». – 2001. – Вип. 5, Т. 1. – С. 117 – 125.

Надійшла до редколегії 10.01.2012.

УДК 536.24

Е. О. Дидинская, Д. В. Евдокимов, А. А. Кочубей

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТЕЛАХ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ

На основі методу граничних елементів запропоновано новий, більш економічний чисельний алгоритм розрахунку температурних полів у тілах з включеннями. Проаналізовано граничні випадки співвідношень властивостей основного середовища та матеріалів включень. Запропоновані підходи можуть бути застосовані у широкому колі теплових розрахунків.

Ключові слова: метод граничних елементів, включення, температура, метод малого параметра.

На основе метода граничных элементов предложен новый, более экономный численный алгоритм расчета температурных полей в телах с включениями. Проанализированы предельные случаи соотношений свойств основной среды и матери-