

DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2025.73.520-535>

УДК 532.542+697.329

Човнюк Юрій Васильович,

кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичного виховання та спорту

Київського національного університету будівництва і архітектури

chovniuk.iuv@knuba.edu.ua

<http://orcid.org/0000-0002-0608-0203>

Чередніченко Петро Петрович,

доцент кафедри міського будівництва

Київського національного університету будівництва і архітектури

cherednichenko.pp@knuba.edu.ua

<http://orcid.org/0000-0001-7161-661X>

Москвітін Анна Сергіївна,

кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції

Київського національного університету будівництва і архітектури

moskvitina.as@knuba.edu.ua

<http://orcid.org/0000-0003-3352-0646>

Васильєва Ганна Юріївна,

кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва

Київського національного університету будівництва і архітектури

vasylieva.giu@knuba.edu.ua

<http://orcid.org/0000-0003-0557-6925>

ТЕПЛОАСОСНІ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ҐРУНТУ ТА ВОДОНОСНИХ ГОРИЗОНТІВ У ЯКОСТІ АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОТИ

Анотація: у сучасному світі, де енергоефективність та використання відновлюваних джерел енергії є ключовими пріоритетами, значну увагу приділяють розвитку систем сезонного акумулювання теплоти. Ці системи відіграють вирішальну роль у зберіганні надлишкової теплової енергії, отриманої протягом теплого періоду, для подальшого використання в опалювальний сезон. Різноманіття геологічних умов та доступних технічних рішень обумовлює широкий спектр типів акумуляторів теплоти, включаючи штучні підземні порожнини, водоносні горизонти, сонячні ставки та ґрунтові теплообмінники. Особливу перспективу мають природні геологічні утворення, які є ефективним та довговічним середовищем для зберігання теплоти. Такі рішення можуть бути впроваджені як у великомасштабних енергетичних системах, так і в індивідуальному будівництві, сприяючи сталому розвитку та зниженню викидів парникових газів. Останнє десятиліття відзначилося інтенсивними дослідженнями та розробками у сфері нанорідин як перспективних

теплоносіїв. Ці стабільні дисперсії наночастинок металів, вуглецю або кремнію в рідкому середовищі демонструють унікальні теплофізичні властивості, що нагадують рідкі метали: високу теплопровідність, ефективне поглинання сонячного випромінювання та можливість магнітного керування потоком. Завдяки цим характеристикам нанорідини знаходять успішне застосування в сонячних, геотермальних та теплонасосних системах, а також у системах охолодження, дозволяючи підвищити ефективність відбору тепла до півтора разів. Проте, однією з невирішених проблем залишається проектування теплообмінників для цих рідин, що потребує подальших досліджень. Важливу роль у вивченні характеристик потоків, сил на обтічних поверхнях та віброакустичних явищ відіграють теоретичні методи, що базуються на рівняннях гідродинаміки та чисельних способах їх розв'язку. Особливу увагу при цьому приділяють розв'язку системи рівнянь Нав'є-Стокса. Метою представленої публікації є розробка методики визначення профілю швидкості та об'ємної витрати при усталеному ізотермічному ламінарному, повністю розвиненому русі нестиснутої ступеневої (неньютонівської) рідини у горизонтальній трубі під дією гідростатичного тиску.

Ключові слова: теплові насоси; відновлювані джерела енергії; акумулювання теплоти; теплоаккумулятор; неньютонівські рідини; нанорідини; теплообмінники; енергоефективність; профіль швидкості.

Постановка проблеми. У сучасних умовах підвищеної уваги до енергоефективності та використання відновлюваних джерел енергії важливого значення набуває розвиток систем сезонного акумулювання теплоти (АТ). Такі системи дозволяють ефективно зберігати надлишкову теплову енергію, отриману впродовж теплого періоду року, для подальшого її використання в опалювальний сезон [1, 2]. Різноманітність геологічних умов та доступних технічних рішень зумовлює широкий спектр типів АТ: від штучних підземних порожнин і водоносних горизонтів до сонячних ставків і ґрунтових теплообмінників. У цьому контексті особливу увагу приділяють використанню природних геологічних утворень як ефективного і довговічного середовища для збереження теплоти [3,4]. Розглянуті в матеріалі рішення мають значний потенціал для впровадження як у великомасштабних енергетичних системах, так і в індивідуальному будівництві, особливо з огляду на потреби сталого розвитку та зниження викидів парникових газів [6]. Дослідження та розробки останнього десятиліття показали, що новий клас теплоносіїв на основі нанорідин - стабільної дисперсії наночастинок твердого матеріалу (металу, вуглецю або кремнію) в рідкому середовищі є перспективним теплоносієм в системах сонячного, геотермального теплопостачання, а також як рідини для охолодження та

теплонасосних систем. За своїми теплофізичними властивостями такі рідини нагадують рідкі метали: висока теплопровідність, можливість ефективного поглинання сонячного випромінювання, а також магнітного керування перебігом, що сприяє успішному застосуванню нанорідин в різних енергетичних системах, підвищення ефективності відбору тепла до півтора разів. Але є питання по проєктуванню теплообмінників для даних рідин [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед різних засобів отримання інформації про характеристики потоку, про сили на поверхнях, які обтікаються, про віброакустичні явища важливу роль відіграють теоретичні методи, які спираються на рівняння гідродинаміки й чисельні способи їх розв'язку. При цьому основні зусилля спрямовані на розв'язок системи рівнянь Нав'є-Стокса [3, 4, 7].

Мета публікації полягає в розробці методики визначення профілю швидкості та об'ємної витрати при усталеному ізотермічному ламінарному, повністю розвинутому русі нестиснутої степеневої (неньютонівської) рідини у горизонтальній трубі під дією гідростатичного тиску, прикладеного до одного з кінців труби.

Основна частина.

Для створення великих АТ, що забезпечують сезонне акумулювання, економніше використовувати штучні підземні порожнечі: їх питома вартість при місткості більше 100 тис. м³ істотно менше, ніж у сталевих АТ. Ще нижче питома вартість акумулювання теплоти при використанні підземних водоносних горизонтів [8 - 9]. Цей порівняльно новий метод акумулювання представляється досить перспективним, оскільки водоносні горизонти поширені досить широко, вони є природними утвореннями, і тому практично єдиним видом капітальних витрат при створенні таких АТ буде вартість буріння свердловин для забезпечення доступу до горизонту. Важливим достоїнством цього методу є також і те, що теплота в даному випадку акумулюється не тільки в об'ємі води, але і в гірській породі водоносного горизонту. Природний АТ не зношується, не вимагає технічного обслуговування і ремонту, а термін його використання практично необмежений [10 - 11].

АТ, що створюються в підземних водоносних горизонтах являють собою систему поглинальних та експлуатаційних свердловин, що експлуатують природний водоносних, водопроникний, гідроізолюваний зверху і знизу підземний колектор (рис. 1). Глибина розташування колектора-акумулятора може становити від 10 м і більше (до 1000 м) [1, 2]. У період «заряджання» колектора-акумулятора проміжний теплоносі, який видобувається системою видобувних свердловин, подається до джерела енергії, де обігрівается. Потім обігрітий теплоносі накопичується в підземному колекторі-акумуляторі через

систему поглинальних свердловин. При цьому відбувається накопичення як теплоти, що міститься у самому проміжному теплоносії, так і теплоти, що накопичується за рахунок обігріву скелета породи. В якості джерела енергії теплота від якого акумулюється підземним водонасиченим шаром, може розглядатись система сонячних теплових колекторів (СТК), котел сміттєспалюючого заводу, скидна теплота підприємств [11]. Слід підкреслити, що розглянутий тип підземних сезонних АТ теплоти можливо використовувати для зберігання як низькотемпературної ($T = 25^{\circ}\text{C} \dots 60^{\circ}\text{C}$), так і високотемпературної ($T > 60^{\circ}\text{C}$) теплоти. При використанні для опалення теплових насосів можливо обійтись без додаткового накопичення теплоти в літній період. При цьому використовується лише теплота підземних вод, що накопичена при їх природному русі. У цьому випадку системи опалення забезпечуються за рахунок експлуатаційних запасів підземних вод водоносного горизонту [12].

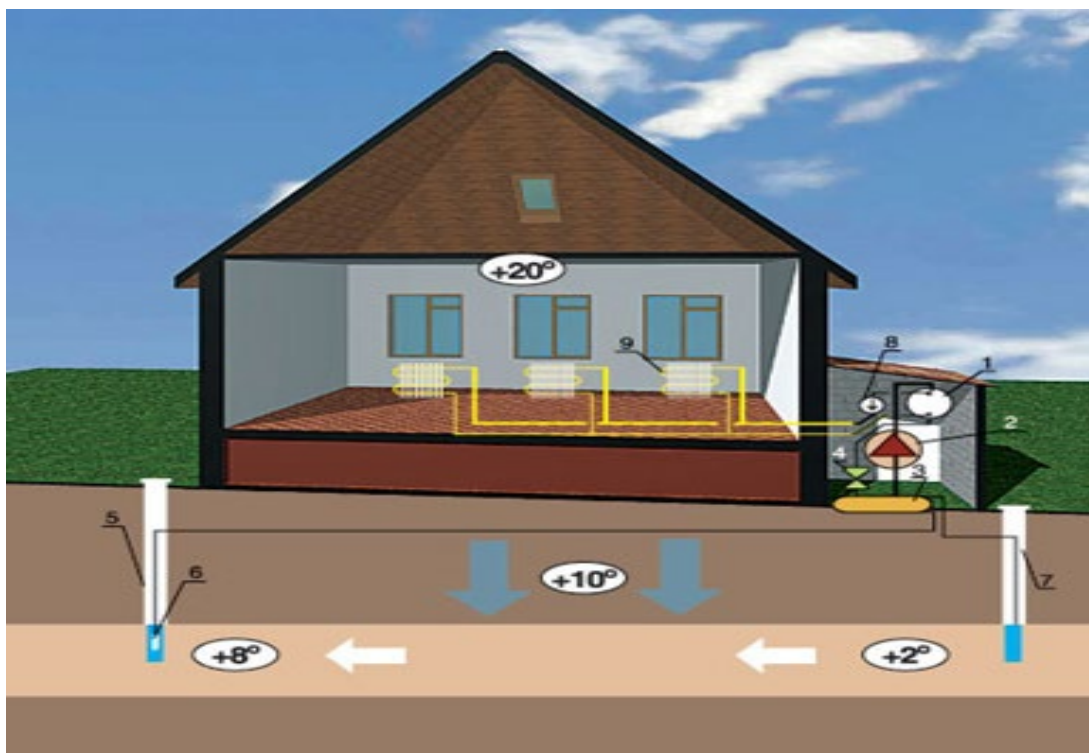


Рис. 1. Технологічна схема сезонного підземного АТ, який створюється у близькому до поверхні водоносному горизонті: 1-розширювальний бак; 2-насос; 3-буферна ємність; 4-перепускний клапан; 5- видобувна свердловина; 6- поплачковий датчик; 7- поглинальна свердловина; 8-насос системи опалення; 9-система опалення [1].

Резервуар для води може бути виконаний у вигляді ями в ґрунті (рис. 2). По донній частині й бічним сторонам ями укладають тепло- і гідроізоляцію; поверхню води захищають теплоізолюючою плаваючою кришкою, на якій

встановлюють СТК. Місткість таких АТ виміряється сотнями й десятками тисяч кубометрів [1, 2].

АТ в природних водоймах засновано на відділенні частини озера або морської затоки за допомогою теплоізолюючої завіси. Поверхню води захищають плаваючою теплоізоляцією в такий же спосіб, як й у випадку ями-акумулятора. Цей варіант ставиться до вискоєфективних, оскільки є можливість організувати акумулятори більших розмірів і при цьому уникнути витрат на виїмку ґрунту [3, 4].

У світовій практиці є досвід будівництва в скельових виїмках сховищ для нафти й зрідженого газу. Подібні скельові виїмки можуть бути використані й для акумулювання гарячої води. У Швеції в селищі Ликебю обладнана в скельних породах порожнина для сезонного акумулювання місткістю 10 000 м³. Порожнина не має теплоізоляції; інтервал робочих температур становить 90...40°C. Навколишні шари скельної породи також служать для акумулювання теплоти [1, 12].

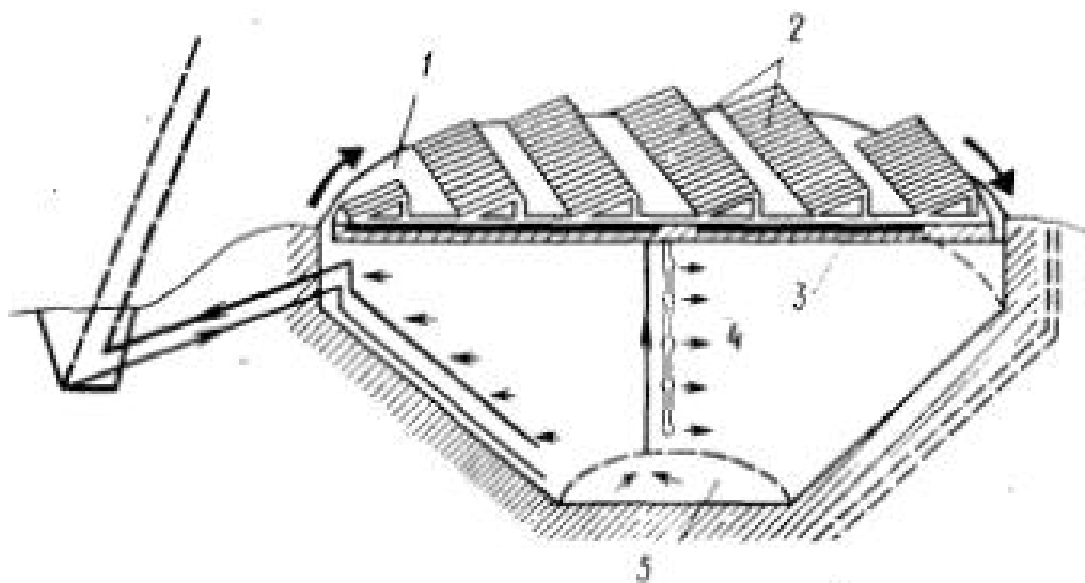


Рис.2. АТ в ґрунтовій впадині в Студвіке (Швеція): 1 – поворотна кришка; 2 – СТК; 3 – теплоізоляція; 4 – подача нагрітої води; 5 – захисне покриття [2].

При акумулюванні теплоти сонячної енергії за допомогою ставків їх використовують ще й як СТК. Сонячний ставок (рис.3) – це обсяг води з різною концентрацією солі: у верхніх шарах вона менше, ніж у нижніх. Сонячне випромінювання викликає більше інтенсивне нагрівання нижніх щільних шарів. Перепад густин досягається штучним або природним шляхом. При цьому верхні, менш нагріті шари води служать теплоізоляцією. Існують й інші способи зменшення тепловтрат з поверхні, аналогічні відкритим колекторам, наприклад, засклення. Ставок глибиною 1 м акумулює 15...25 % теплоти падаючого

випромінювання. Більша глибина забезпечує кращу ізоляцію, але до нижніх шарів доходить менша кількість теплоти. Оптимальна глибина ставка становить 1...2 м. Сонячні ставки дають велику кількість низькотемпературного теплоти, стійкі до денних змін кліматичних параметрів і здатні підтримувати позитивну температуру протягом зими [2, 4].

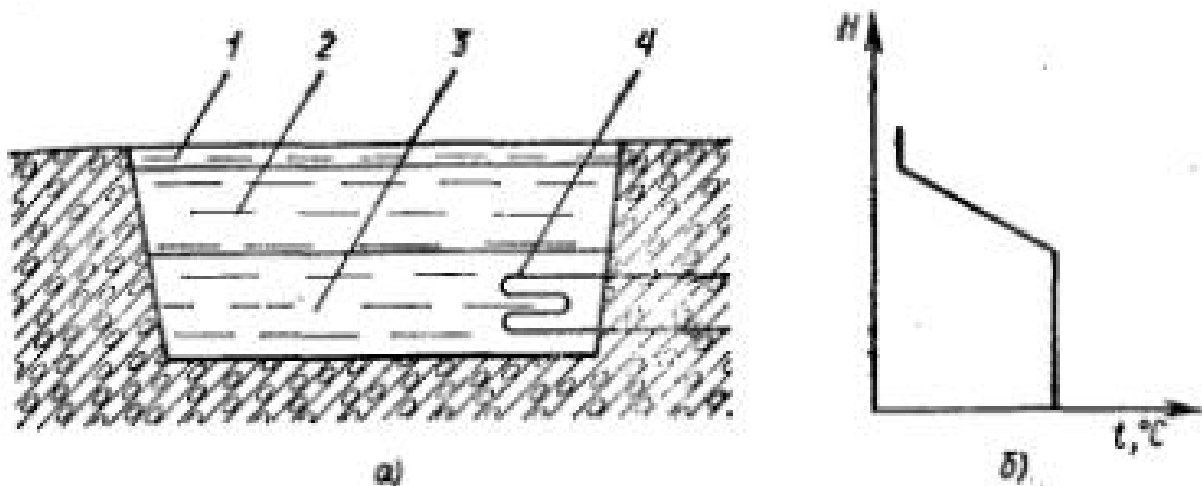


Рис. 3. Схема сонячного ставка (а) і зміна температури (б) рідини по висоті ставка:
1 – прісна вода; 2 – ізолюючий шар з концентрацією, яка збільшується донизу;
3 – шар гарячого розчину; 4 – теплообмінник [1].

Теплова енергія ґрунту та ґрунтових вод може використовуватися для обігріву та вентиляції приміщень. Відбір теплової енергії від ґрунту може здійснюватися за допомогою фунтових теплообмінників різних типів. Температура теплоносія в ґрунтовому теплообміннику становить від мінус 5...7 до плюс 10...12°C і є придатною для виробництва теплоносія з температурою 40-70°C за допомогою теплових насосів. Досвід провідних країн свідчить, що енергію ґрунту найчастіше використовують в теплонасосних установках потужністю до 70-100 кВт, які обслуговують окремі невеликі будинки, головним чином садибні житлові будинки [1, 2]. В умовах України це можуть бути садибні будинки міст та сіл.

Ґрунтові АТ з горизонтальними теплообмінниками - це приповерхневий шар ґрунту, в межах якого розташовується під'єднана до споживачів система спеціально прокладених горизонтальних теплообмінників (рис. 4). Теплообмінники можуть бути різної форми та конфігурації і виготовленими з різних матеріалів. Глибина їх розташування становить не менше 1,5...2 метрів, тобто нижче рівня глибини промерзання ґрунту, причому ґрунт, в якому розташовуються ці теплообмінники, може бути як відносно сухим, так і водонасиченим [1, 13, 14].

Дослідження та розробки останнього десятиліття показали, що новий клас теплоносіїв на основі нанорідин - стабільної дисперсії наночастинок твердого матеріалу (металу, вуглецю або кремнію) в рідкому середовищі є перспективним теплоносієм в системах сонячного, геотермального теплопостачання, а також як рідини для охолодження та теплонасосних систем. За своїми теплофізичними властивостями такі рідини нагадують рідкі метали: висока теплопровідність, можливість ефективного поглинання сонячного випромінювання, а також магнітного керування перебігом, що сприяє успішному застосуванню нанорідин в різних енергетичних системах, підвищення ефективності відбору тепла до півтора разів. Але є питання по проєктуванню теплообмінників для даних рідин.

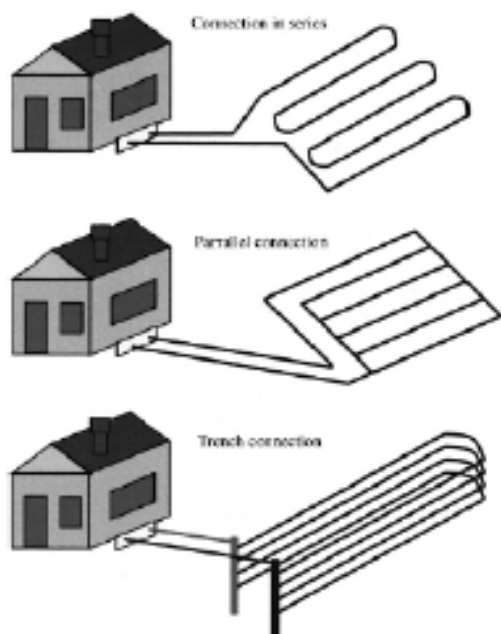


Fig. 4. Horizontal-type ground heat exchangers (redrawn from Ref. [3]).

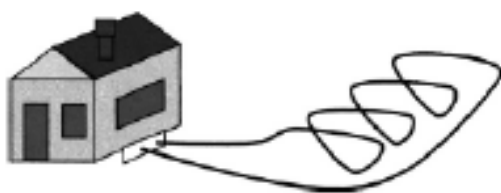


Fig. 5. "Slinky"-type ground heat exchanger.

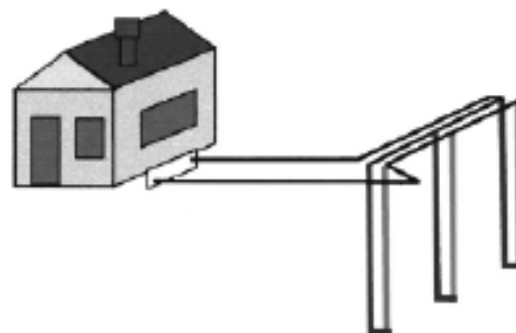
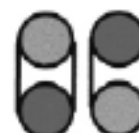


Fig. 6. Vertical ground heat exchangers.

Single U-pipe
Pipe diameter = 25-32 mm
Width = 50-70 mm



Double U-pipe
Pipe diameter = 25-32 mm
Max. width = 70-80 mm



Simple Coaxial
External diameter = 40-60 mm



Complex Coaxial
Max. width = 70-90 mm

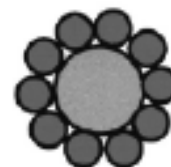


Fig. 7. Common vertical ground heat exchanger designs.

Рис.4. Варіанти конструкції ґрунтових теплообмінників [3]

Неньютонівські рідини, які використовуються в інженерних системах (теплоносій в геліоколекторах, теплообмінниках акумуляторів теплоти, теплоносій в теплонасосних системах [13, 14]) відрізняються реологічними

(структурно-механічними) властивостями від ньютонівських рідин. Саме тому вдосконалення усіх процесів з неньютонівськими рідинами неможливе без врахування реологічних властивостей речовин, в тому діапазоні напружень (зсуву), в якому вони використовуються [7, 13, 15]. Розглянемо усталений ізотермічний ламінарний, повністю розвинутий рух/течію нестиснутої степеневі (неньютонівської) рідини у горизонтальній трубі під дією гідростатичного тиску, прикладеного до одного з кінців труби. Необхідно знайти: 1) профіль швидкостей; 2) об'ємні витрати.

Розв'язок 1. Оскільки течія здійснюється у трубі, використаємо циліндричну систему координат. Течія ізотермічна, й рідина нестиснута; тому рівняння руху безперервності й визначальне рівняння повністю визначають течію [7, 14]. Із міркувань симетрії будемо вважати, що у напрямку θ течія відсутня й $v_\theta = 0$. Рух повністю розвинутий – це означає, що $\frac{\partial v_z}{\partial t} = 0$. (Введена циліндрична система координат (r, θ, z)) [15]. Рівняння безперервності приймає вид:

$$\frac{\partial}{\partial r}(r \cdot v_r) = 0 \quad (1)$$

Після інтегрування (1) матимемо: $r \cdot v_r = C$, де C – константа.

На стінці труби $v_r = 0$, й, відповідно, $C = 0$, та $v_r = 0$. Таким чином, маємо тільки одну ненульову компоненту швидкості $\vec{v} = (v_r, v_\theta, v_z)$, а саме $v_z \neq 0$, яка є функцією одного лише r . Три компоненти рівняння руху приймуть вид:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial \theta} = 0; \quad \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \{r \cdot (\tau_{rz})\}, \quad (2)$$

де, P – ізотропний тиск у трубі, $\tau_{rz} - (rz)$ – компонента динамічного чи тензор-девіатора напружень.

Зрозуміло, що P є функцією тільки z (це випливає зі співвідношень (2)), а права частина останнього рівняння у (2) залежить тільки від r , тому частинні похідні можна замінити на повні й провести інтегрування [16, 17]:

$$\tau_{rz} = -\frac{r}{2} \cdot \frac{dP}{dz} + C_1, \quad (3)$$

де, C_1 – константа інтегрування.

Єдина ненульова компонента градієнту швидкості у розглядуваній течії – це dv_z/dr . Тензор швидкостей деформації зсуву приймає вид:

$$\dot{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & dv_z/dr \\ 0 & 0 & 0 \\ dv_z/dr & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Визначальне рівняння записується як:

$$\tau_{rz} = -m \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \cdot \dot{\gamma}_{rz}. \quad (5)$$

Тут:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}(\dot{\gamma}:\dot{\gamma})} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{ij} \cdot \dot{\gamma}_{ji}} = \sqrt{\left(\frac{dv_z}{dr}\right)^2} = \left|\frac{dv_z}{dr}\right|. \quad (6)$$

Після підстановки у визначальне рівняння це дає:

$$\tau_{rz} = -m \cdot \left[\left(\frac{dv_z}{dr}\right)^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \cdot \frac{dv_z}{dr} = -m \cdot \left|\frac{dv_z}{dr}\right|^{n-1} \cdot \frac{dv_z}{dr}. \quad (7)$$

Зазначимо, що $\dot{\gamma}$ (модуль $\dot{\gamma}$) – величина завжди додатка, тому беруться абсолютне значення величини, котра визначає залежність в'язкості від швидкості зсуву [18]. З рівняння (7) випливає, що при $r = 0$, де $\frac{dv_z}{dr} = 0$, $\tau_{rz} = 0$ й константа C , у (3) дорівнює нулю. З рівнянь (3) та (7) матимемо:

$$m \cdot \left|\frac{dv_z}{dr}\right|^{n-1} \cdot \frac{dv_z}{dr} = \frac{r}{2} \cdot \frac{dP}{dz}. \quad (8)$$

При течії у трубі для всіх r справедливою є нерівність $dv_z/dr < 0$ [35,36], тому (8) запишеться як:

$$-\frac{dv_z}{dr} = \left(-\frac{r}{2m} \cdot \frac{dP}{dz}\right)^S, S = \frac{1}{n}. \quad (9)$$

Похідна $\frac{dP}{dz} < 0$, а величина, яка піднесена до степені S у правій частині (9) додатня [19, 20]. Це рівняння можна проінтегрувати з граничною умовою $v_z(R) = 0$, де R – внутрішній радіус труби:

$$v_z(r) = \frac{R}{(S+1)} \cdot \left(-\frac{R}{2m} \cdot \frac{dP}{dz}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{S+1}\right]. \quad (10)$$

Розв'язок 2. Об'ємні витрати отримаємо з (10):

$$Q = \int_0^R 2\pi r v_z dr = \frac{\pi R^3}{(S+3)} \left\{ \left(-\frac{R}{2m} \right) \cdot \left(\frac{dP}{dz} \right) \right\}^S. \quad (11)$$

Оскільки $\frac{dP}{dz}$ – величина постійна, (11) можна записати як:

$$Q = \frac{\pi R^3}{(S+3)} \left(-\frac{R}{2m} \cdot \frac{\Delta P}{L} \right)^S, \quad (12)$$

де, $\Delta P = P_L - P_0$ (P_0 – тиск при $z = 0$, P_L – при $z = L$).

При $s = 1$ рівняння (12) перетворюється у відоме рівняння Гагена-Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu L} (P_0 - P_L), \quad (13)$$

де, μ – динамічна в'язкість рідини.

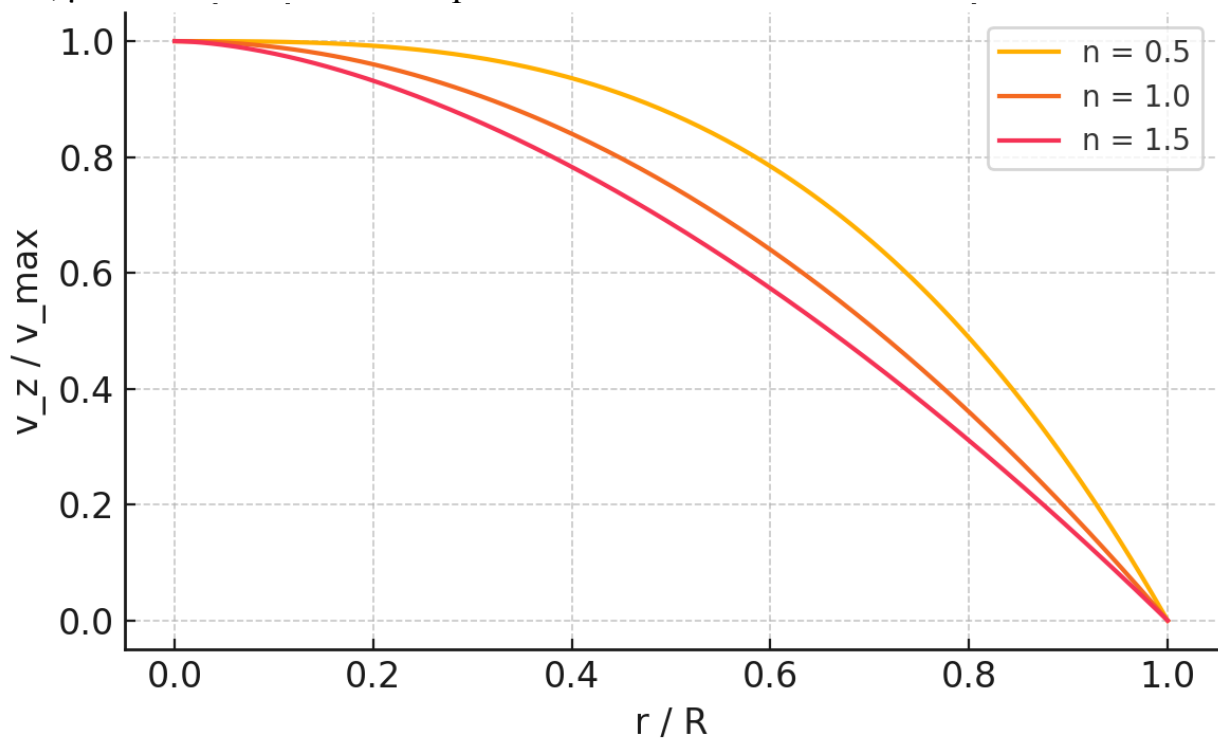


Рис.5. Профіль осьової швидкості для різних n [розроблено авторами]

Графік на рис.5 демонструє залежність нормованої осьової швидкості $v_z / v_{\max}$ від радіального положення r / R для різних значень показника степеневості n .

Зменшення n (до псевдопластичної рідини) робить профіль плоскішим, що означає вищу ефективність переносу маси та теплоти, особливо в центральній частині. Збільшення n веде до локалізації потоку в центрі труби, що може призвести до перевантаження чи нестабільного теплообміну при проєктуванні теплообмінників.

Аналізуючи графік на рис. 5 можна зробити висновок, що при $n = 0.5$ — псевдопластична рідина має профіль плоский в центрі, висока швидкість зберігається на значній частині радіусу. При цьому ньютонівська рідина ($n = 1.0$) має класичний параболічний профіль і швидкість лінійно знижується до стінки. При $n = 1.5$ — дилатантна рідина має загострений профіль, різке зменшення швидкості від центру, потік концентрується біля осі.

Для систем акумуляції теплоти, де використовуються неньютонівські теплоносії, важливо враховувати цей профіль при розрахунках теплового переносу та гідравлічних втрат.

Висновки. Наведено критичне значення сезонного акумулювання теплоти в сучасних енергетичних системах, особливо в контексті підвищеної уваги до енергоефективності та використання відновлюваних джерел енергії. Такі системи дозволяють ефективно зберігати надлишкову теплову енергію, отриману в теплий період, для використання в опалювальний сезон, що є ключовим для сталого розвитку та зниження викидів парникових газів. Детально розглянуто різноманітні підходи до створення акумуляторів теплоти. Окрему увагу приділено нанорідинам як інноваційним теплоносіям. Їхні унікальні теплофізичні властивості, такі як висока теплопровідність та ефективне поглинання сонячного випромінювання, роблять їх надзвичайно перспективними для підвищення ефективності енергетичних систем. Однак, зазначається, що проєктування теплообмінників для цих рідин є викликом, який потребує подальших досліджень. Розгляд неньютонівських рідин та їх реологічних властивостей є фундаментальним для оптимізації процесів теплообміну та зниження гідравлічних втрат. Запропонована методика дозволяє аналітично визначити профіль швидкості та об'ємну витрату степеневих рідин у круглих трубах. Це є актуальним при проєктуванні енергоефективних систем з використанням нанорідин у теплообмінниках акумуляторів теплоти. Одержані формули дають змогу враховувати вплив показника степеневості та коефіцієнта консистенції рідини при аналізі ефективності теплопередачі. Аналіз профілю швидкості показує, що зміна показника степеневості може суттєво впливати на ефективність перенесення маси та теплоти. Розуміння цих властивостей є

критичним для коректного проєктування інженерних систем з такими теплоносіями.

Список літератури:

1. Забарний Г. М. Сезонне акумулювання теплоти в підземних акумуляторах: навч. посіб. Київ: ВІОЛ-ПРИНТ, 2009. 150 с. ISBN 978-966-02-5273-8.
2. Сиротюк М. І. Поновлювані джерела енергії: навч. посіб. Львів. нац. ун-т ім.І.Франка. Львів, 2008. 248 с.
3. Eskilson P. Thermal analysis heat extraction boreholes: Ph. D. Thesis. Lund, 1987. ISBN 91-7900-298-6.
4. Diersch H.-J. G., Rühaak W., Schätzl P., Bauer D., Heidemann W. Numerical Modelling of Solar Heat Storage Using Large Arrays of Borehole Heat Exchangers // Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25–29 April 2010. 9p. URL: https://www.igte.uni-stuttgart.de/veroeffentlichungen/publikationen/publikationen_10-03.pdf
5. Любарець О.П., Москвітін А.С. Аналіз конструкцій сезонних теплоакумуляторів для забезпечення систем гарячого водопостачання та опалення в котеджному будівництві. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2015. Вип. 18. С.61–69.
6. Любарець О.П., Москвітін А.С. Порівняння конструкцій теплових акумуляторів з твердим теплоакумуляуючим матеріалом та комбінованим теплоакумуляуючим матеріалом. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2016. Вип. 19. С.101–111. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ccb16593-5195-4975-bc99-08a28b6f7d3e/content>
7. Човнюк Ю., Чередніченко П., Москвітін А. Аналіз нагріву пропіленгліколю/етиленгліколю у циліндричному каналі сонячного теплового колектору. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. Вип. 86. С.370–387. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.86.370-387>
8. Москвітін А.С. Розрахунок оптимальної товщини теплової ізоляції сезонного акумулятора теплоти. *Містобудування та територіальне планування*. 2018. Вип. 67. С.298–307.
9. Любарець О.П., Москвітін А.С. Техніко-економічне обґрунтування використання теплоакумуляуючих матеріалів для систем міжсезонного сонячного теплопостачання. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2014. Вип.17. С.115–119. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp_2014_17_20
10. Любарець О.П., Москвітін А.С. Вибір форми і розрахунок об'єму сезонного акумулятора теплоти. *Вентиляція, освітлення та*

- теплогазопостачання. 2016. Вип.20. С.24–38. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/items/989cbd52-42f5-46b8-8e64-86dedf576591>
11. Москвітін А. Аналітична модель системи теплопостачання з геліоколекторами та акумулятором теплоти. *Молодий вчений*. 2020. Вип. 79. С.193–198. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-41>
 12. Жітаренко В.М. *Відновлювані і вторинні джерела енергії*. Маріуполь: ПДТУ, 2006. 160 с.
 13. Човнюк Ю., Москвітін А., Пефтьєва І. Вдосконалення методів структурно-параметричної оптимізації в аналізі ґрунтових акумуляторів теплоти. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2022. Вип. 42. С.38–47. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.42.38-47>
 14. Chovniuk Y., Moskvitina A., Rybachov S., Zynych P. Nonisothermal flow of nanofluid in ground heat accumulator for decentralized heat supply of rural facilities for various purposes // *Engineering for Rural Development : proceedings of the 23rd International Scientific Conference*. Jelgava, Latvia, 22–24 May 2024. Vol. 23. P. 623–629. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF116>
 15. Brovarets O., Chovniuk Y., Moskvitina A. Rheodynamics non-viscous medium in long (cylindrical) pipes: using the Ostwald–De Ville model // *ECONTECHMOD: An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes*. 2020. Vol.9, No.2. P.19–22. URL: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-4486df62-b1df-4b1c-8fde-31692c15434f>
 16. Shenoy A. V. *Heat Transfer to Non-Newtonian Fluids: Fundamentals and Analytical Expressions*. John Wiley & Sons, 2018. 308 p. ISBN 978-3-527-34362-1.
 17. Chhabra R. P., Patel S. A. *Bubbles, Drops, and Particles in Non-Newtonian Fluids* (3rd ed.). CRC Press, 2017. 733 p. ISBN 9781498759556.
 18. Wong R. *Asymptotic and Computational Analysis: Conference in Honor of Frank W. J. Olver's 65th Birthday*. Boca Raton : CRC Press, 1990. 776 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003072584>
 19. Thompson J. F., Thames F. C., Mastin C. W. Automatic numerical generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies // *Journal of Computational Physics*. 1974. Vol. 15, Issue 3. P. 299–319. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(74\)90114-4](https://doi.org/10.1016/0021-9991(74)90114-4)
 20. Thompson J. F., Thames F. C., Mastin C. W. TOMCAT — A code for numerical generation of boundary-fitted curvilinear coordinate systems on fields containing any number of arbitrary two-dimensional bodies // *Journal of Computational Physics*. 1977. Vol. 24, Issue 3. P. 274–302. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(77\)90038-9](https://doi.org/10.1016/0021-9991(77)90038-9)

References

1. Zabarnyi, H. M. (2009). Sezone akumuliuvannia teploty v pidzemnykh akumulatorakh [Seasonal heat storage in underground accumulators]. VIOL-PRINT. (in Ukrainian).
2. Syrotyuk, M. I. (2008). Renewable energy sources. Lviv National University named after Ivan Franko. (in Ukrainian).
3. Eskilson, P. (1987). Thermal analysis of heat extraction boreholes (Doctoral dissertation). Lund University. ISBN 91-7900-298-6. (in English).
4. Diersch, H.-J. G., Rühaak, W., Schätzl, P., Bauer, D., & Heidemann, W. (2010). Numerical modelling of solar heat storage using large arrays of borehole heat exchangers. In Proceedings of the World Geothermal Congress 2010 (pp. 1–9). Bali, Indonesia. https://www.igte.uni-stuttgart.de/veroeffentlichungen/publikationen/publikationen_10-03.pdf (in English).
5. Liubarets, O. P., & Moskvitina, A. S. (2015). Analysis of seasonal heat storage structures for domestic hot water supply and heating systems in cottage construction. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply, 18, 61–69. (in Ukrainian).
6. Liubarets, O. P., & Moskvitina, A. S. (2016). Comparison of thermal storage designs with solid heat storage material and combined heat storage material. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply, 19, 101–111. <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ccb16593-5195-4975-bc99-08a28b6f7d3e/content> (in Ukrainian).
7. Chovniuk Y., Cherednichenko, P., & Moskvitina, A. (2024). Analysis of propylene glycol/ethylene glycol heating in the cylindrical channel of the solar heat collector. Urban Development and Spatial Planning, (86), 370–387. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.86.370-387> (in Ukrainian).
8. Moskvitina, A. S. (2018). Calculation of the optimal thickness of thermal insulation of a seasonal heat storage unit. Urban Development and Territorial Planning, 67, 298–307. (in Ukrainian).
9. Liubarets, O. P., & Moskvitina, A. S. (2014). Techno-economic justification of the use of heat storage materials for interseasonal solar heat supply systems. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply, 17, 115–119. http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp_2014_17_20 (in Ukrainian).
10. Liubarets, O. P., & Moskvitina, A. S. (2016). Selection of shape and calculation of the volume of a seasonal heat storage unit. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply, 20, 24–38. <https://repository.knuba.edu.ua/items/989cbd52-42f5-46b8-8e64-86dedf576591> (in Ukrainian).
11. Moskvitina, A. (2020). Analytical model of a heat supply system with solar collectors and a heat storage unit. Young Scientist, 79, 193–198. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-41> (in Ukrainian).

12. Zhitarenko, V. M. (2006). Renewable and secondary energy sources. Pryazovskyi State Technical University. (in Ukrainian).
13. Chovniuk Y., Moskvitina, A., & Peftieva, I. (2022). Improvement of the methods of structural-parametric optimization in the analysis of ground heat accumulators. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, 42, 38–47. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.42.38-47> (in Ukrainian).
14. Chovniuk, Y., Moskvitina, A., Rybachov, S., & Zynych, P. (2024). Nonisothermal flow of nanofluid in ground heat accumulator for decentralized heat supply of rural facilities for various purposes. In *Proceedings of the 23rd International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”* (Vol. 23, pp. 623–629). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF116> (in English).
15. Brovarets, O., Chovniuk, Y., & Moskvitina, A. (2020). Rheodynamics non-viscous medium in long (cylindrical) pipes: Using the Ostwald–De Ville model. *ECONTECHMOD: An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes*, 9(2), 19–22. <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-4486df62-b1df-4b1c-8fde-31692c15434f> (in English).
16. Shenoy, A. V. (2018). *Heat transfer to non-Newtonian fluids: Fundamentals and analytical expressions*. John Wiley & Sons. (in English).
17. Chhabra, R. P., & Patel, S. A. (2017). *Bubbles, drops, and particles in non-Newtonian fluids* (3rd ed.). CRC Press. (in English).
18. Wong, R. (1990). *Asymptotic and computational analysis: Conference in honor of Frank W. J. Olver’s 65th birthday* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003072584> (in English).
19. Thompson, J. F., Thames, F. C., & Mastin, C. W. (1974). Automatic numerical generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies. *Journal of Computational Physics*, 15(3), 299–319. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(74\)90114-4](https://doi.org/10.1016/0021-9991(74)90114-4) (in English).
20. Thompson, J. F., Thames, F. C., & Mastin, C. W. (1977). TOMCAT—A code for numerical generation of boundary-fitted curvilinear coordinate systems on fields containing any number of arbitrary two-dimensional bodies. *Journal of Computational Physics*, 24(3), 274–302. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(77\)90038-9](https://doi.org/10.1016/0021-9991(77)90038-9) (in English).

Abstract

Yuriy Chovniuk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Department of Physical Education and Sports, Kyiv National University of Construction and Architecture.

Petro Cherednichenko, Associate Professor. Department of Urban Construction, Kyiv National University of Construction and Architecture.

Anna Moskvitina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Kyiv National University of
Construction and Architecture.

Hanna Vasylieva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Department of Urban Construction, Kyiv National University of Construction and
Architecture.

Heat pump systems using soil and aquifers as heat storage

In today's world, where energy efficiency and the use of renewable energy sources are key priorities, considerable attention is being paid to the development of seasonal heat storage systems. These systems play a crucial role in storing excess thermal energy obtained during the warm period for further use during the heating season. The diversity of geological conditions and available technical solutions has led to a wide range of heat storage types, including artificial underground cavities, aquifers, solar ponds and ground heat exchangers. Natural geological formations, which are an effective and durable medium for heat storage, offer particular promise. Such solutions can be implemented in both large-scale energy systems and individual construction, contributing to sustainable development and reducing greenhouse gas emissions. The last decade has been marked by intensive research and development in the field of nanoliquids as promising heat carriers. These stable dispersions of metal, carbon or silicon nanoparticles in a liquid medium demonstrate unique thermophysical properties reminiscent of liquid metals: high thermal conductivity, efficient absorption of solar radiation and the possibility of magnetic flow control. Thanks to these characteristics, nanofluids are successfully used in solar, geothermal and heat pump systems, as well as in cooling systems, allowing heat extraction efficiency to be increased by up to one and a half times. However, one of the unresolved problems remains the design of heat exchangers for these fluids, which requires further research. Theoretical methods based on hydrodynamic equations and numerical methods for their solution play an important role in studying the characteristics of flows, forces on streamlined surfaces, and vibroacoustic phenomena. Particular attention is paid to the solution of the Navier-Stokes equation system. The purpose of this publication is to develop a method for determining the velocity profile and volumetric flow rate in steady isothermal laminar, fully developed motion of an incompressible power (non-Newtonian) fluid in a horizontal pipe under the action of hydrostatic pressure.

Keywords: heat pumps; renewable energy sources; heat accumulation; heat accumulator; non-Newtonian fluids; nanofluids; heat exchangers; energy efficiency; velocity profile.