

В. Г. ДЕМЧЕНКО, О. В. БАРАНЮК, А. Ю. РАЧИНСЬКИЙ

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ І ТЕПЛООБМІНУ В БАКУ-АКУМУЛЯТОРІ ТЕПЛОТИ

Робота присвячена дослідженню резервуарів для зберігання теплової енергії. В ній запропоновано використання «термічного ядра» для мінімізації ефектів термічної стратифікації та високої теплової інерції. Термічний сердечник складається з бінарної трубки, розміщеної вздовж центральної осі резервуара, заповненої парафіновою сумішшю з температурою плавлення від 45 до 65°C і щільністю від 0,880 до 0,915 г/см³ при 15°C. У дослідженні використовувався програмний пакет Fluent для моделювання розподілу температури в резервуарі в умовах вільної конвекції, а потім дані перетворені в модуль «Transient Thermal» пакету програмного забезпечення ANSYS для подальших розрахунків нестационарного розподілу температури в тепловому ядрі. Дослідження показало, що 1400-літровий накопичувач теплової енергії, нагрітий протягом 1 години теплоносієм при 115°C, охолоджується до 50°C за 4 години. У ході дослідження також виявлено необхідність удосконалення конструкції резервуара на основі аналізу гідродинамічної структури течії в резервуарі, про що свідчить траєкторний розподіл вільних конвективних потоків. Автори прийшли до висновку, що використання теплового сердечника, незалежно від типу парафіну, який використовується для його формування, сприяє зменшенню стратифікації температури за висотою в резервуарі, та що тип використовуваного парафіну не має істотного впливу на загальне охолодження резервуара. Однак використання церезину, як наповнювача для теплового ядра, призводить до трохи вищої середньої температури в баку. За результатами дослідження було визначено час повного охолодження резервуара за неоднорідним температурним полем усіх елементів резервуара.

Ключові слова: вільна конвекція, бак-акумулятор теплоти, стратифікація температури, тепла інерція, термічний сердечник, теплове ядро, озокерит, петролатум, церезин.

В. Г. ДЕМЧЕНКО, А. В. БАРАНЮК, А. Ю. РАЧИНСКИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В БАКЕ-АККУМУЛЯТОРЕ ТЕПЛОТЫ

Работа посвящена исследованию резервуаров для хранения тепловой энергии. В нем предложено использование «термического ядра» для минимизации эффектов термической стратификации и высокой тепловой инерции. Термический сердечник состоит из бинарной трубки, размещенной вдоль центральной оси резервуара, заполненной парафиновой смесью с температурой плавления от 45 до 65°C и плотностью от 0,880 до 0,915 г/см³ при 15°C. В исследовании использовался программный пакет Fluent для моделирования распределения температуры в резервуаре в условиях свободной конвекции, а затем данные преобразованы в модуль «Transient Thermal» пакета программного обеспечения ANSYS для последующих расчетов нестационарного распределения температуры в тепловом ядре. Исследование показало, что 1400-литровый накопитель тепловой энергии, нагретый в течение 1 часа теплоносителем при 115°C, охлаждается до 50°C за 4 часа. В ходе исследования также выявлено необходимость совершенствования конструкции резервуара на основе анализа гидродинамической структуры течения в резервуаре, о чем свидетельствует траекторное распределение свободных конвективных потоков. Авторы пришли к выводу, что использование теплового сердечника, независимо от типа парафина, используемого для его формирования, способствует уменьшению стратификации температуры по высоте в резервуаре и тип используемого парафина не оказывает существенного влияния на общее охлаждение резервуара. Однако использование церезина в качестве наполнителя для теплового ядра приводит к более высокой средней температуре в баке. По результатам исследования было определено время полного охлаждения резервуара по неоднородному температурному полю всех элементов резервуара.

Ключевые слова: свободная конвекция, бак-акумулятор теплоты, стратификация температуры, тепловая инерция, термический сердечник, тепловое ядро, озокерит, петролатум, церезин.

V. G. DEMCHENKO, O. V. BARANYUK, A. YU. RACHYNSKYI

SIMULATION OF FLOW AND HEAT EXCHANGE IN A HEAT ACCUMULATOR TANK

The article deals with the research of thermal energy storage tanks. It is proposed to use a «thermal core» to minimize the effects of thermal stratification and high thermal inertia. The thermal core consists of a binary tube placed along the central axis of the tank, filled with a paraffin mixture with a melting point of 45 to 65°C and a density of 0,880 to 0,915 g/cm³ at 15°C. In the study the Fluent software package was used to model the temperature distribution in the tank under free convection conditions, the data was then converted to the Transient Thermal module of the ANSYS software package for further calculations of the unsteady temperature distribution in the thermal core. The study showed that a 1400-liter thermal energy storage device, heated for 1 hour by a heat-transfer fluid at 115°C, cools down to 50°C in 4 hours. The research also revealed the need to improve the tank design based on the analysis of the hydrodynamic structure of the flow in the tank, as evidenced by the trajectory distribution of free convective flows. The authors concluded that the use of a heat core, regardless of the type of paraffin used to form it, helps to reduce temperature stratification by height in the tank and that the type of paraffin used has no significant effect on the overall cooling of the tank. However, using ceresin as a core filler results in a slightly higher average tank temperature. Based on the results of the study, the time of complete cooling of the tank was determined by the non-uniform temperature field of all elements of the tank.

Key words: free convection, heat storage tank, temperature stratification, heat inertia, thermal core, thermonuclear, ozokerite, petrolatum, ceresine.

Вступ. Постійне зростання цін на *викопне паливо* вимагає від *сучасних систем опалення та гарячого водопостачання* максимального використання *альтернативних джерел теплоти*. У зв'язку з тим, що піки виробництва і споживання теплоти в таких системах зазвичай не збігаються в часі, неможливо забезпечити ефективне використання альтернативних джерел без інтеграції *теплоакумулятора* в систему опалення. *Теплоакумулятивний бак* зазвичай являє собою теплоізолювану ємність, призначену для акумуляції теплоти та нагріву гарячої води. Сьогодні теплоакумулятори стали невід'ємною частиною систем опалення. Використовуються в системах опалення в комплексі з *сонячними колекторами, тепловими насосами, твердопаливними котлами, електрообіг-*

ривачами, що працюють за нічним тарифом [1, 2, 3]. Принцип роботи теплоакумулятора заснований на збільшенні об'єму опалювальної системи і використанні високої теплоємності води. Акумуляторні баки зазвичай використовуються в системах опалення разом з твердопаливними та електричними котлами, тепловими насосами та іншими джерелами теплоти. Буферні баки дозволяють розвантажити систему від перепадів температури, захищають від закипання, а також можуть підтримувати температуру теплоносія певний час при вимкненому джерелі теплоти. Крім того, буферна ємність дозволяє розширити діапазон регулювання температури теплоносія. Акумуляторні баки можуть бути оснащені змішувачем для підігріву гарячої води або для підтримки певної робочої температури теплоносія. У цьому їх принципова відмінність від бойлерів непрямого нагріву. Однак буферні баки з підігрівом води схильні до *явища термічного розшарування* та мають високу *теплову інерцію*. Відмінністю представленої конструкції від відомих є наявність так званого «теплового ядра» в центрі термоізованого бака, наповненого водою. Необхідність використання «теплового сердечника» в першу чергу спрямована на запобігання температурного розшарування по висоті теплоакумулятора. Як теплоакумуляційний матеріал для «теплового ядра» використовується *парафін*, який має високу теплоємність і низьку вартість.

Аналіз останніх досліджень. Система центрального опалення (ЦО) вимагає адекватної стратегії зберігання теплової енергії. Це означає баланс між навантаженням системи та потребою в енергії, оптимізуючи виробництво тепла [4, 5]. На *теплових електричних станціях (ТЕС)* розглядаються можливості *прямого* та *непрямого* методів зберігання тепла, а також їх особливості щодо потужності, щільності зберігання, обмежень зарядки/розрядки тощо. Результати вказують на можливість автоматичного регулювання потужності непрямих методів, таких як *теплові акумулятори (ТА)* з використанням *фазозмінних матеріалів (ФКМ)* або накопичення тепла в свердловинах, що робить річну продуктивність ЦО більш оптимальною, ніж пряме накопичення. Зарядно-розрядний ТА залишається вразливою частиною ЦО, оскільки неможливо досягти повної зарядки та продовжити час розряду ТА. Однак компактний ТА має значні перспективи для широкомасштабного використання тепла.

Вторинних джерел енергії (ВТЕР) та *відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)* багато в містах, які є основними споживачами низькоякісної теплової енергії в Україні. Відомо, що інтеграція цих джерел у систему централізованого опалення дає можливість значно скоротити споживання викопного палива та викиди вуглецю в атмосферу. Європейські директиви пропонують і заохочують енергомодернізацію ЦО та житлового фонду. Технічні та законодавчі документи у сфері розвитку теплових мереж створюють сприятливі умови для інтеграції ВТЕР та ВДЕ.

Цьому сприяє розробка сучасного покоління систем теплопостачання, яке характеризується зниженням температури подачі теплової енергії. На відміну від загальноприйнятих типів високотемпературних систем першого покоління або циркуляційних систем другого і третього поколінь, які використовують температуру теплоносія вище 100°C , в системах четвертого покоління температура подачі нижче 100°C . Ця тенденція реалізується за рахунок розвитку методів управління попитом, збільшення об'єму теплоносія.

Зокрема, якщо залучити до системи теплопостачання відновлювальні джерела енергії (ВТЕР і ВДЕ), встановлення зрошувальних систем може значно покращити використання енергії. Крім того, порівняно з традиційною конфігурацією без зрошувальних систем, встановлення буферних ємностей дозволяє продовжити час використання відновлювальних джерел енергії (рис. 1).

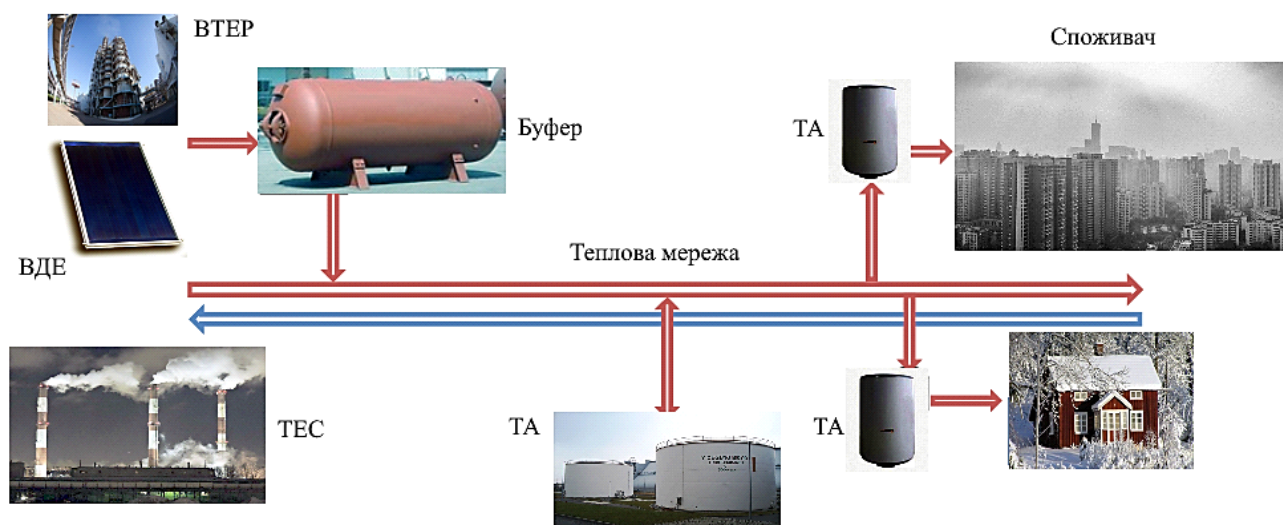


Рис. 1 – Теплова система зберігання енергії.

Для теплового акумулявання енергії твердими і рідкими тілами використовуються спеціальні матеріали, які здатні зберігати тепло за допомогою зміни своєї температури. Такі матеріали можуть бути різних видів, наприклад, камінь, бетон, вода, солі, метали, глини тощо.

Для теплового акумулювання енергії за допомогою використання теплоти фазового переходу використовуються речовини, які здатні зберігати тепло за рахунок зміни свого агрегатного стану. Найпоширенішим прикладом є парафін, який під час плавлення поглинає значну кількість теплоти.

Термохімічне акумулювання теплової енергії полягає у зберіганні теплоти за рахунок зміни хімічного складу речовини. Наприклад, для такого акумулятора можна використовувати хімічні реакції, які супроводжуються звільненням теплоти.

Кожен з цих типів акумуляції має свої переваги та недоліки, тому вибір конкретного типу залежить від умов експлуатації та вимог до системи.

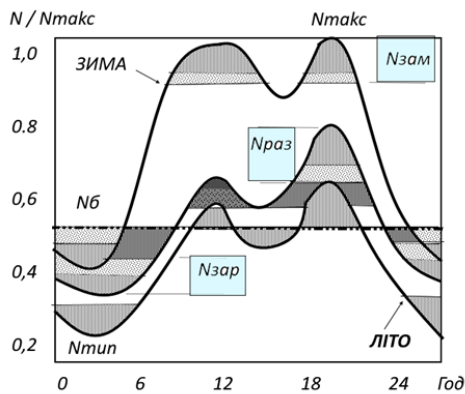


Рис. 2 – Характерні графіки добового навантаження.

На сьогоднішній день існує два шляхи зниження енергоємності національного продукту: підвищення ефективності перетворення первинної енергії в електроенергію і тепло, а також підвищення ефективності використання енергії у споживачів. Використання поновлюваних джерел енергії та підвищення ККД теплоелектростанцій є прикладами першого шляху. Збільшення частки атомних електростанцій, використання вітру, геотермальної енергії, припливів, морських хвиль і таке інше також можуть бути використані для підвищення ефективності перетворення первинної енергії (рис. 2).

Другий шлях полягає в підвищенні ефективності використання енергії у споживачів, таких як промисловість, транспорт, сільське господарство та побутові споживачі. Перехід на більш досконалі технології, використання вторинних енергетичних ресурсів та вирівнювання тимчасових невідповідностей між виробленою енергією і потребами в ній за допомогою акумулювання є прикладами захо-

дів, які можуть бути вжиті для підвищення ефективності використання енергії у споживачів.

Для підвищення ефективності зберігання теплоти в резервуарі можна застосовувати різні методи, наприклад, встановлювати відсіки у резервуарі, які розділятимуть рідину на окремі зони з різною температурою. Також можна використовувати термічні перегородки для зниження дифузії теплоти між шарами рідини. Окрім того, важливо забезпечити оптимальний режим роботи системи, який залежить від характеристик теплового навантаження. Зберігання теплоти в резервуарі нерозривно пов'язано з забезпеченням оптимальних умов існування природної конвекції яка призводить до так званого явища «термоклин» – тонкого шару, який розділяє холодну область і гарячу область. Зокрема, важливо мати достатню висоту резервуару, щоб стимулювати створення термоклин і підтримувати його стабільність. Також слід уникати примусової конвекції, яка може розбити термоклин та знизити ефективність зберігання теплоти.

Враховуючи сказане вище, актуальним завданням є необхідність зменшити втрати теплоти та знизити енергоспоживання на підтримку оптимальної температури зберігання теплоти у стратифікованому резервуарі, що, в свою чергу, дозволяє перерозподіляти одержання і споживання енергії в часі.

Постановка задачі. Основна мета статті полягає в тому, щоб визначити теплофізичну ефективність різних типів парафіну для формування «теплового ядра» в баку-акумуляторі теплоти. Для цього автори використовують методи CFD-моделювання в умовах вільної конвекції води в обмеженому просторі, щоб визначити час охолодження бака-акумулятора після нагрівання водою з певною температурою та витратою. У статті обрано три типи парафіну – озокерит, петролатум і церезин, які мають близькі теплофізичні властивості. Автори досліджують час охолодження бака-акумулятора, який нагрівався 1 годину водою з температурою 115°C , що рухалася з витратою $2,2\text{ м}^3/\text{год}$ у здовж поверхні теплообміну, конструктивно виготовленої у вигляді змійовика.

Математична модель. CFD-модель бака-акумулятора теплоти, яка описана в статті, включає як тверді об'єми, так і рідинні об'єми. Тверді об'єми представлені змійовиком і металевими конструкціями корпусу бака-акумулятора, в яких передача теплоти відбувається за рахунок теплопровідності. Рідинні об'єми включають охолоджуючу воду в змійовику, прошарок води ззовні нього і парафін, що використовується як «теплове ядро».

CFD-модель дозволяє дослідити процеси теплообміну і гідродинаміки, які відбуваються в баку-акумуляторі теплоти. Оскільки в системі спостерігаються явища вільної конвекції в обмеженому просторі, модель передбачає окремі математичні моделі для рідинних і твердих об'ємів.

На рис. 3 показано CFD-модель бака-акумулятора теплоти. «Теплове ядро» в формі контейнера з парафіном 1 оточене об'ємом води 2, а нагрівання або охолодження системи здійснюється за допомогою змійовика 3, розташованого по периферії бака-акумулятора. Модель також включає конструктивні елементи бака-акумулятора, які також піддаються нагріванню.

Відомо, що явища вільної конвекції в рідині загалом описуються досить складною нелінійною системою рівнянь в частинних похідних. Ця система містить рівняння збереження енергії, імпульсу і маси та рівняння ста-

ну. В числовому моделюванні широко застосовуються різноманітні наближені підходи. Найбільш поширеним є підхід Буссінеска, який передбачає додаткові спрощення, зокрема, заміну диференціальних операторів скінченними різницями та використання шаблонів для наближення похідних. Для вирішення системи рівнянь застосовують різні числові методи, такі як метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод гладких частин та інші [6]:

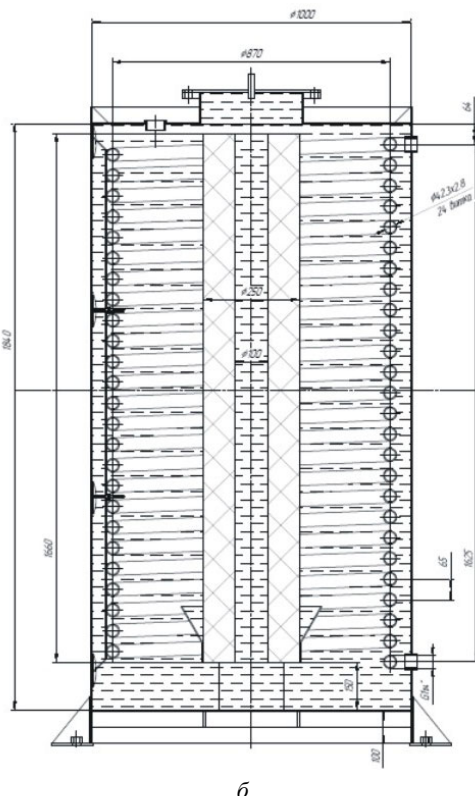


Рис. 3 – Бак-акумулятор теплоти:
а – комп'ютерна модель;
б – креслення реальної конструкції.

Рівняння нерозривності потоку:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0. \quad (1)$$

Рівняння Нав'є – Стокса для ламінарного режиму течії:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} + \beta g \vec{e}. \quad (2)$$

Рівняння Фур'є – Кірхгофа:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \nabla T = a \nabla^2 T, \quad (3)$$

де ρ_0 – середнє значення густини середовища при температурі T_0 , а β – коефіцієнт об'ємного розширення води, що може бути обчислений за допомогою залежності:

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_T. \quad (4)$$

В дану систему, яка визначає невідомі функції \vec{v} , p , T входять три параметри: коефіцієнт теплопровідності a , коефіцієнт кінематичної в'язкості ν , прискорення вільного падіння g і коефіцієнт об'ємного розширення води β . Всі вище перераховані коефіцієнти в моделі описуються за допомогою поліноміальних залежностей від температури.

Процеси, що спостерігаються в вище перерахованих твердотільних об'ємах – це процеси теплопровідності, змінної у часі [7, 8, 9]. Тому математична модель для твердотільних об'ємів базується на рівнянні теплопровідності:

$$c_m \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

де c_m – середня питома теплоємність матеріалу (у випадку розробленої CFD-моделі – нержавіюча сталь), Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³; T – температура, К; τ – час, с; λ – теплопровідність, Вт/(м·К); x, y, z – декартові координати, м.

Початковими умовами рівняння (5) є значення температури $T(x, y, z)$ рідини, що отримані після розв'язання математичної моделі (1) – (4) в баку-акумуляторі при $\tau = 0$. Граничні умови для твердотільних об'ємів – граничні умови першого роду. В якості цих граничних умов використовується визначена за допомогою *Fluent* (попередньо) температура стінки на внутрішній поверхні тіла змійовика площею S , що визначається як:

$$T = T(S, \tau). \quad (6)$$

Один із способів розв'язання крайових задач теплопровідності – мінімізація відповідного функціоналу на множині функцій, які відповідають умовам завдання граничних умов [6]. З варіаційної точки зору, розв'язок рівняння (5) з необхідними граничними умовами (8) еквівалентний знаходженню мінімуму функціоналу:

$$E = \frac{1}{2} \int \lambda \left(\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + \left(c_m \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) T \right) dv + \int_{S_\alpha} \alpha \left(\frac{T}{2} - T_\infty \right) T dS. \quad (7)$$

Отже, програмний продукт *Ansys* використовується в розробленій CFD-моделі для мінімізації функціоналу з допомогою *матричних методів*. Для моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки в рідинах використовується нерівномірна, зі згущенням до стінок, тетраедрична сітка з моделюванням примежового шару за допомогою функції *Inflation*. В примежовому шарі використовується паралелепіпедальний скінченний елемент, а мінімальний та максимальні кроки становлять $1 \cdot 10^{-6}$ і $1 \cdot 10^{-3}$ м відповідно. Кількість частинок в примежовому шарі обмежена – 10.

Результати роботи програми. Модель дозволила розрахувати теплові потоки в змійовику та в баку-акумуляторі теплоти, як при нагріванні, так і при охолодженні. У випадку нагрівання, потік води в змійовику був достатньо інтенсивним, щоб нагріти воду в баку-акумуляторі до температури принаймні 98°C . Також було зазначено, що температура парафіну була менша за температуру води. Це пов'язано з тим, що теплопровідність парафіну втричі нижча, ніж теплопровідність води. Оскільки парафін не є добрим провідником теплоти, то його температура підвищувалась повільніше, ніж температура води.

Значення температури поверхні змійовика, наведені на рис. 4, необхідні для подальшого визначення (шляхом вирішення нестационарної задачі теплопровідності) типу парафіну, який слід використовувати як «теплове ядро». Для всіх досліджуваних випадків з різними видами парафіну з різними теплофізичними властивостями час нагріву об'єму ємності вибирали постійним і становив 1 годину.

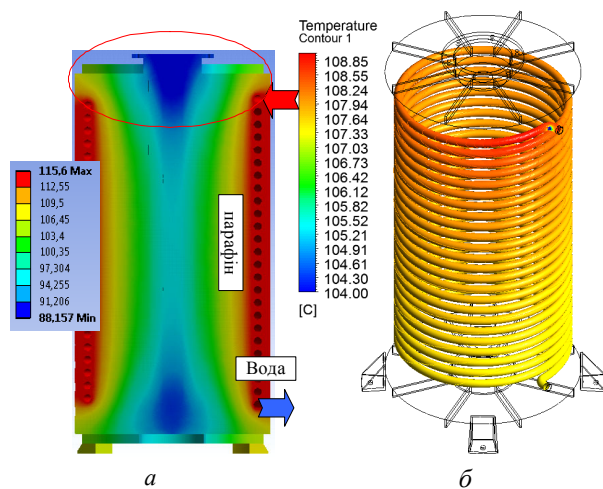


Рис. 4 – а – розподіл температур в двовимірному перерізі бака-акумулятора теплоти; б – температурне поле стінки змійовика при нагріванні.

Розподіл вільно-конвективних потоків як в поздовжньому, так і в поперечному перерізах акумуляторної ємності представлено на рис. 5, а, б, який свідчить про формування складного тривимірного вихору в об'ємі, заповненому водою. Це викликано зміною густини води в баку і виникненням рушійної сили. Рух води починається в напрямку руху годинникової стрілки у поперечному напрямку біля найбільш нагрітої стінки змійовика, що призводить до виникнення потужних вихорів у поперечному напрямку. Також зазначено, що напрямок руху вихорів відбувається «знизу-вверх», тобто проти сили тяжіння, а обертальний рух у вихорах спостерігається в протилежних напрямках, щоб вихори «підживлювали» один одного.

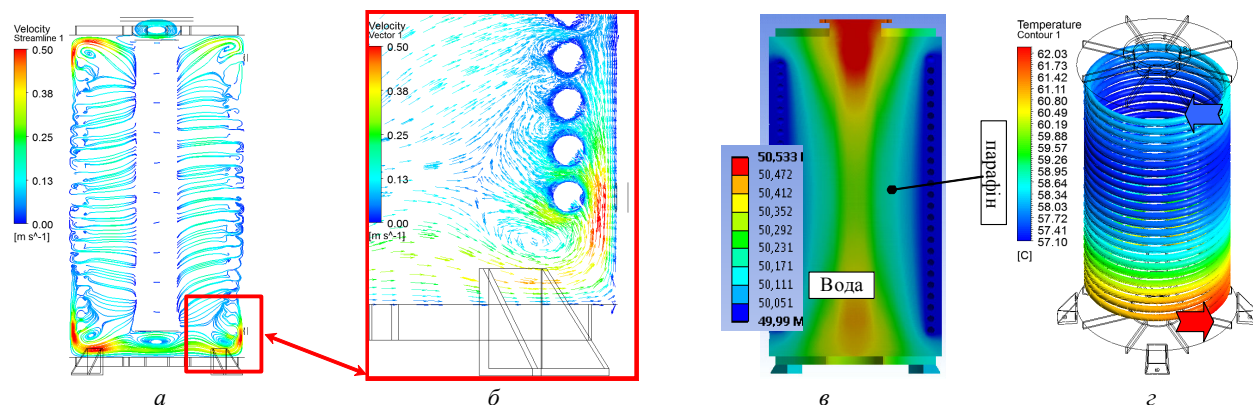


Рис. 5 – а – розподіл температур в двовимірному перерізі бака-акумулятора теплоти; б – температурне поле стінки змійовика при охолодженні; в – траєкторії вільно-конвективних потоків в поздовжньому перерізі бака-акумулятора; г – вектори швидкості потоків в збільшеному масштабі.

Умови формування застійної зони між вихорами створюються в центральній зоні над і під «тепловим ядром». В цій зоні відсутнє інтенсивне перемішування потоку, що призводить до зниження температури, як це показано на рис. 5.

Як і при нагріванні бака-акумулятора, результати розрахунку температурного поля при його охолодженні аналогічні (рис. 5, в, з). При охолодженні, як і у випадку з нагріванням, суттєвий вплив має гідродинамічна структура потоку, а також не можна виключити того, що на початку охолодження температурне поле бака-акумулятора було неоднорідним. У ньому були зони з різною температурою. Тому при охолодженні кожна точка розрахункової області мала свою початкову температуру. Отже, висновок напрашується сам собою – процес нагрівання бака істотно впливає на закономірності його охолодження. Аналіз гідродинамічної структури потоку можна провести за розподілом траєкторій вільно-конвективних потоків у водній масі гідроакумулятора. При охолодженні, як і в задачі про нагрівання, у масі води виникає система завихрень, які розташовані у взаємно перпендикулярних площинах. Так, у верхній і нижній частинах бака (рис. 5, в) над і під «тепловим ядром» виникають вихори, що обертаються в поздовжньому напрямку, а між змійовиком і бічною площиною ємності – вихори, що обертаються в поперечному напрямку «теплого ядра» (рис. 6, з).

Отже, дослідження показали, що в центральній частині бака-акумулятора створюються кращі умови для охолодження, а на периферії виникають застійні зони через гаряче «теплове ядро». В ході дослідження були порівняні три типи парафіну для створення «теплого ядра», і виявлено, що тип парафіну не має значущого впливу на час охолодження бака-акумулятора. Проте, застосування парафіну «церезин» дає більш широку зону нагрітого центрального сердечника і приблизно на $0,5^{\circ}\text{C}$ вищу середню температуру бака в цілому, що робить його більш перспективним варіантом для використання як «теплого ядра».

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на модернізації конструкції бака-акумулятора теплоти, щоб визначити умови для створення рівномірного температурного поля в баку та подовжити час його охолодження.

Висновки. У цьому дослідженні використовувалися методи CFD моделювання, щоб визначити, що конструктивні особливості досліджуваного резервуара теплового акумулятора створюють застійні зони теплоти над і під «тепловим ядром» на периферії резервуара. Це призводить до погіршення умов теплообміну в цих зонах, а також перешкоджає температурному розшаруванню по всій висоті бака. Було показано, що в об'ємі води в резервуарі формується нерівномірне температурне поле, яке може бути викликано нерівномірним надходженням теплоти або впливом вільно конвекційних потоків, які виникають через різницю в густині води.

Визначено, що час, необхідний для повного охолодження бака-акумулятора теплоти об'ємом 1400 л, становить 4 години. Також встановлено, що серед усіх досліджених видів парафіну церезин є найбільш придатним для використання в якості «теплого ядра».

Список літератури

1. НВП «ГІДРОТЕРМ ІНЖИНІРІНГ». – Режим доступу : [https:// http://www.gidro-term.com.ua/142-stati/376-bak-akkumulyator-tepla-teploakku-mulyator-ustrojstvo-montazh-normy](https://http://www.gidro-term.com.ua/142-stati/376-bak-akkumulyator-tepla-teploakku-mulyator-ustrojstvo-montazh-normy). – Дата звернення : 14 квітня 2023.
2. ДБН В.2.5-77:2014, Котельні. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2014.
3. ДБН В.2.5-39:2008, Теплові мережі. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009.
4. European Commission. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings; European Commission: Brussels, Belgium, 2016. – Режим доступу : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016PC0765>. – Дата звернення : 16 квітня 2023.
5. Lizanaa J., Chacarteguib R., Barrios-Paduraa A., Valverdec J. M., Ortizc C. Identification of best available thermal energy storage compounds for low-to-moderate temperature storage applications in buildings // *Materiales de Construcción*. – July–September 2018. – Vol. 68. – Issue 331. – ID 160. DOI:10.3989/mc.2018.10517.
6. Мартиненко О. Г., Соковичин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмін : Справочник. – М. : Наука и техника, 1982. – 400 с.
7. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide. – New-York, USA : ANSYS Inc, 2012. – 789 p.
8. Мяченков В. И., Мальцев В. П., Майборода В. П. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов. – М. : Машиностроение, 1989. – 520 с.
9. Демченко В. Г., Баранюк О. В. CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки в баку-акумуляторі теплоти // *KPI Science News*. – 2020. – No. 2, 2020. – С. 17 – 24.

References (transliterated)

1. *NVP «GIDROTERM INZHYNIRING»* [«HYDROTERM ENGINEERING» JSC]. Available at : [https:// http://www.gidro-term.com.ua/142-stati/376-bak-akkumulyator-tepla-teploakku-mulyator-ustrojstvo-montazh-normy](https://http://www.gidro-term.com.ua/142-stati/376-bak-akkumulyator-tepla-teploakku-mulyator-ustrojstvo-montazh-normy). (accessed 14 April 2023).
2. *DBN V.2.5-77 : 2014, Kotel'ni* [State Building Standards of Ukraine V.2.5-77: Boiler-houses]. Kyiv, Minregionstroy of Ukraine, 2014.
3. *DBN V.2.5-39 : 2008, Teplovi merezhi* [State Building Standards of Ukraine V.2.5-39: 2008, Heating Networks]. Kyiv, Minregionstroy of Ukraine, 2009.
4. European Commission. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings; European Commission: Brussels, Belgium, 2016. Available at : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016PC0765> (accessed 16 April 2023).
5. Lizanaa J., Chacarteguib R., Barrios-Paduraa A., Valverdec J. M., Ortizc C. Identification of best available thermal energy storage compounds for

low-to-moderate temperature storage applications in buildings. *Materiales de Construction*. July–September 2018, vol. 68, issue 331, ID 160. DOI:10.3989/mc.2018.10517.

6. Martinenko O. G., Sokovishin Yu. A. *Svobodno-konvektivnyy teploobmen : Sptavochnik* [Free Convective Heat Transfer : handbook]. Moscow, Nauka I tekhnika Publ., 1982. 400 p.
7. ANSYS FLUENT 14.5 *Theory Guide*. New-York, USA, ANSYS Inc, 2012. 789 p.
8. Myachenkov V. I., Maltsev V. P., Mayboroda V. P. *Raschety mashinostroitel'nykh konstruksiy metodom konechnykh elementov* [Calculations of engineering structures by the finite element method]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 520 p.
9. Demchenko V. H., Baraniuk O. V. CFD-modelyuvannya protsesiv teploobminu i gidrodynamiky v baku-akumulyatori teploty [CFD-modeling of heat exchange processes and hydrodynamics in a heat storage tank]. *KPI Science News*. 2020, no. 2, 2020, pp. 17–24.

Надійшла (received) 20.04.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Демченко Володимир Георгійович – кандидат технічних наук, завідувач лабораторії процесів та технологій теплозабезпечення, Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ; тел.: (098) 884-71-44; e-mail: dr-demch@meta.ua.

Демченко Владимир Георгиевич – кандидат технических наук, заведующий лаборатории процессов и технологий теплообеспечения, Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев; тел.: (098) 884-71-44; e-mail: dr-demch@meta.ua.

Demchenko Volodymyr Georgyovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Heat Supply Processes and Technologies, Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (098) 884-71-44; e-mail: dr-demch@meta.ua.

Баранюк Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри атомної енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 379-80-69; e-mail: AleksandrW@i.ua.

Баранюк Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры атомной энергетики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; тел.: (067) 379-80-69; e-mail: AleksandrW@i.ua.

Baranyuk Oleksandr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of the Heat-and-Power Engineering Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv; tel.: (067) 379-80-69; e-mail: AleksandrW@i.ua.

Рачинський Артур Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (098) 981-55-75; e-mail: arturrachinskiy@gmail.com.

Рачинский Артур Юриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры тепловой и альтернативной энергетики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; тел.: (098) 981-55-75; e-mail: arturrachinskiy@gmail.com.

Rachinskiy Artur Yuriyovych – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv; tel.: (098) 981-55-75; e-mail: arturrachinskiy@gmail.com.