



УДК 697.385

О. А. Климчук<sup>1</sup>, д.т.н.

ORCID: 0000-0002-5207-7259

Г. В. Лужанська<sup>1</sup>, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-3784-5926

В. В. Кандеєва<sup>1</sup>, к.е.н.

ORCID: 0000-0002-8707-0700

І. В. Аксьонова<sup>2</sup>, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-3210-3405

І. В. Борохов<sup>3</sup>, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-3894-5256

<sup>1</sup>Державний університет «Одеська політехніка»<sup>2</sup>Одеська державна академія будівництва та архітектури<sup>3</sup>Таврійський державний агротехнологічний університет імені

Дмитра Моторного

Тел. (048)705-8-403

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ УСТАНОВОК СИСТЕМ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО КОМБІНОВАНОГО ОПАЛЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

*Анотація.* Актуальною проблемою сучасної економіки України в умовах економічної кризи є раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів нашої країни. Одним з шляхів вирішення цієї задачі є акумулювання енергії. Згідно з напрямком Енергетичної стратегії держави на період до 2030 р, все більшої актуальності набувають розробка та впровадження комбінованих вискоелективних систем низькотемпературного опалення на основі альтернативних джерел енергії з використанням тепло акумуляторів.

Розглянуті питання щодо сумісного ефективного використання найбільш розповсюджених комбінаціях сумісного використання різних генераторів теплоти у запропонованих системах.

Виконано дослідження існуючих схем роботи акумуляторів по різним типам приєднання теплоносія. В результаті отримано, що застосування перехресної схеми приєднання теплообмінної установки в системі комбінованого низькотемпературного опалення дозволяє домогтися максимально ефекту.

*Ключові слова:* теплові акумулятори, комбінована система низькотемпературного опалення, тепловий насос.

*Постановка проблеми.* Нестача енергетичних ресурсів є актуальною проблемою України, тому їх раціональне використання –



одна з основних задач економіки. Частковим рішенням цієї проблеми є акумулювання енергії. У відповідності до вимог Енергетичної стратегії України на період до 2030 р., розробленої Міністерством енергетики та вугільної промисловості України, все більшої актуальності набувають розробка та впровадження комбінованих вискоефективних теплонасосних систем низькотемпературного опалення на основі альтернативних джерел енергії [1-3].

*Аналіз останніх досліджень.* Комбіновані теплонасосні системи орієнтовані на використання низькотемпературних систем опалення – водяного радіаторного опалення, водяних «теплих підлог», настінних та теплообмінників, вмонтованих в будівельні конструкції. Такі опалювальні прилади характеризуються невисокою робочою температурою теплоносія, але при цьому, мають розвинену площу. Основний механізм передачі теплоти – вільна конвекція повітря уздовж теплообмінної поверхні з поступовим перемішуванням його в об'ємі приміщення.

Важливим кроком при розробці комбінованої теплонасосної системи опалення є вибір типу теплового насоса та ємність теплового акумулятора.

Для інтенсифікації процесу впровадження інноваційних енерготехнологій необхідно підвищити їх рентабельність шляхом суттєвого збільшення частки заміщення традиційних первинних енергоресурсів альтернативними джерелами енергії.

Впровадження інтегрованих систем автономного теплозабезпечення, що працюють в режимі переривчастого опалення з раціональним використанням енергетичного потенціалу альтернативних джерел енергії; містять акумулятори теплоти, з можливістю накопичення енергії за нічним тарифом; та дублери енергії з високою часткою заміщення традиційних первинних енергоресурсів альтернативним паливом є виправданим, бо дозволяє узгодити графіки генерації й споживання енергії з урахуванням екологічних вимог. При цьому, врахування режимів експлуатації та ступенів термомодернізації будівлі (комбінованої теплової ізоляції стін будинку та приміщень [4]), надає додаткові переваги – призводить до оптимальної організації режиму енергозабезпечення за критерієм максимальної частки заміщення традиційних первинних енергоресурсів.

*Формування цілей.* Метою роботи є науково-технічне обґрунтування умов ефективного впровадження альтернативних джерел енергії з максимально ефективним використанням акумуляторів теплоти.

*Основна частина.* В комбінованих системах зазвичай застосовується два чи більше генератора теплоти. Тривалість та ефективність функціонування кожного із зазначених джерел залежить



від умов експлуатації системи, а саме, від зовнішніх (кліматичних умов) і внутрішніх факторів (постійне опалення, переривчасте опалення, денний тариф, нічний тариф на електроенергію тощо) [1, 3].

Найбільшого розповсюдження такі системи досягли у приватних, котеджах та готелях, де використовуються такі джерела генерації теплоти: газові та твердопаливні котли (котли на рідкому паливі); електричні котли та системи електричного опалювання; теплові насоси; геліосистеми [5-8]. При цьому котли, що використовують тверде паливо для надійної та економічної роботи потребують встановлення спеціальних тепломасообмінних пристроїв - буферних ємностей (акумуляторів тепла) [9].

Режими використання різних альтернативних джерел теплоти у низькотемпературних системах опалення залежать від технічних характеристик обладнання. Теплові насоси із відбором теплоти з зовнішнього повітря доцільно використовувати при температурах не нижче  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [6, 10]. Електричні котли в системах із акумуляванням доцільно застосовувати при використанні нічного тарифу на електроенергію.

При використанні геліосистеми постає питання, на яку частку заміщення традиційної енергії необхідно орієнтуватись, для більш ефективного використання сонячної енергії. Досвід показує, що у геліосистем, які розраховані з пріоритетом забезпечення опалення, влітку виникає проблема із надлишком теплоти. Це призводить до зменшення ефективності сонячних колекторів, якщо не передбачити додатково наявність сезонних споживачів, наприклад, відкриті басейни, куди можна скидати надлишок теплоти з сонячного колектора на підігрів води в них, що суттєво збільшує термін корисного використання геліосистеми впродовж року [11].

Важливою проблемою є вирішення питань щодо сумісного ефективного використання найбільш розповсюджених комбінаціях сумісного використання різних генераторів теплоти (традиційних і альтернативних) [12] в комбінованій системі.

На практиці для узгодження цих режимів роботи системи застосовують зазвичай три інструментарії [13]:

- модуляція потужності джерела теплоти;
- збільшення інерційності системи споживачів теплоти;
- застосування тепломасообмінних установок - акумуляторів тепла.

До числа найбільш простих і надійних пристроїв акумулявання тепла, безумовно, належать рідинні тепло-акумуляуючі матеріали, що пов'язано з поєднанням функцій теплоакумуляуючого матеріалу та теплоносія. В даний час найбільш широко застосовуються вода і водні



розчини солей, високотемпературні органічні та кремнійорганічні теплоносії, розплави солей і металів.

Використання води в якості теплоакумуючого матеріалу може бути доречно для добового та пікового режиму акумулювання в системах низькотемпературного опалення [14, 15].

Існує кілька схем роботи акумуляторів за різними типами приєднання теплоносія:

- паралельна схема руху потоків теплоносіїв;
- перехресна схема руху потоків теплоносіїв;
- сумісна схема руху потоків теплоносіїв.

Системи опалення змінює навантаження впродовж року. При цьому впродовж доби суттєві коливання спостерігаються лише при використанні двоперіодного режиму обігріву приміщень. Окремо треба сказати про використанні системи «тепла підлога» у значних масштабах обігріву приміщень. В таких випадках гідравлічний режим системи опалення не співпадає з гідравлічним режимом джерела тепла (різні перепади температур, внаслідок різні витрати). Для узгодження режимів роботи необхідно встановлювати гідравлічний розподільвач або буферну ємність. Також треба звернути увагу, якщо систем «тепла підлога» має переважний внесок у систему опалення, то виникає проблема неможливості ввійти газовому конденсаційному котлу у конденсаційний режим, а тепловому насосу забезпечити необхідні температури у подавальній магістралі системи «тепла підлога» (теплообмінник котлу та теплового насосу не здатен пропустити необхідну витрату теплоносія з необхідною температурою). В таких випадках слід встановлювати як мінімум два котли.

Для моделювання процесів в акумуляторах теплоти при різних схемах підключення джерела та споживача теплоти був використаний прикладний програмний продукт SolidWorks, що відноситься до САПР – систем автоматизації проектних робіт.

Для знаходження чисельного рішення задачі безперервна нестационарна математична модель фізичних процесів, що використовується в SolidWorks дискретізується як у просторі, так і за часом [16]. Для дискретизації диференціальних рівнянь в SolidWorks використовується метод кінцевих об'ємів [17].

Як і в більшості розрахункових методів, у методі кінцевих об'ємів використовується підхід Ейлера, тобто розглядається рух у виділеній області простору, на відміну від підходу Лагранжа, за яким розглядається рух виділеної області (маси) текучого середовища в просторі (цей підхід зазвичай використовується для розрахунку руху сторонніх часток в текучому середовищі). Якщо задача нестационарна, то відповідно розглядається також еволюція (тобто зміна в часі) течії в виділеній області простору [18].

Математична задача вирішення системи диференціальних та/або інтегральних рівнянь зводиться до математичної задачі розв'язання системи алгебраїчних (зазвичай нелінійних) рівнянь.

Отже інтегральне рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V U dv + \oint_S F ds = \int_V Q dv \quad (1)$$

де  $U$  – вектор фізичних параметрів (незалежних змінних);

$V$  – об'єм комірки;

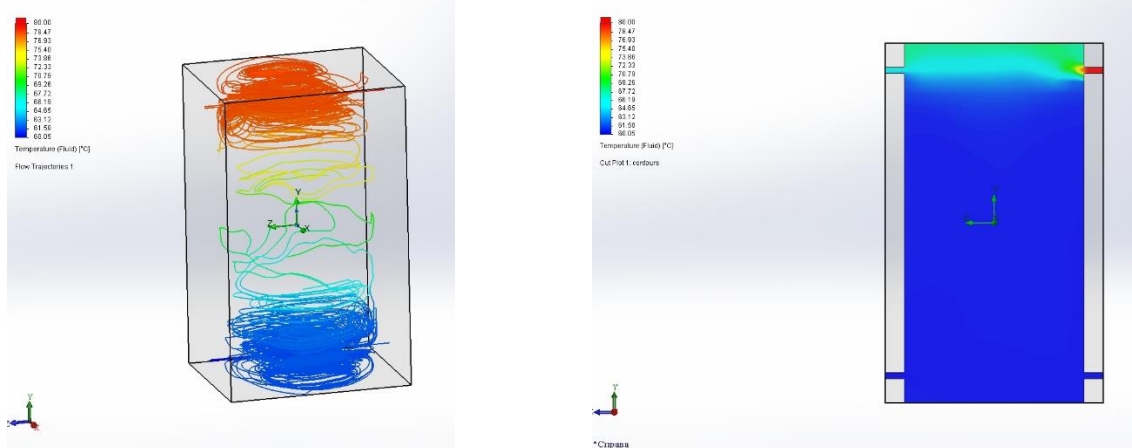
$F$  – потоки;

$S$  – площа поверхні (граней) осередки;

$Q$  – масові сили, перетворюються до дискретної форми:

$$\frac{\partial}{\partial t} (U \cdot V) + \sum_s F \cdot s = Q \cdot V \quad (2)$$

Потоки  $F$  розраховуються з використанням їх апроксимації вперед другого порядку точності, заснованої на модифікованих неявних QUICK-апроксимація Леонарда і методі мінімізації повної варіації TVD. Спеціальні апроксимації застосовуються для конвективних членів, операторів  $\text{div}$  та  $\text{grad}$ . У часткових, тобто пересічених поверхнею твердого тіла на кордоні з текучої середовищем, розрахункових осередках вводяться додаткові внутрішні грані, апроксимуючі потрапила в ці клітинки поверхню твердого тіла, і використовується спеціальна процедура для розрахунку умов на цих гранях. За допомогою пакету програми Flow Simulation на основі програмного забезпечення «SolidWorks» були отримані результати чисельного моделювання теплових процесів в акумуляторі теплоти із візуалізацією поля температур для вказаних схем приєднання (рис 1-3)

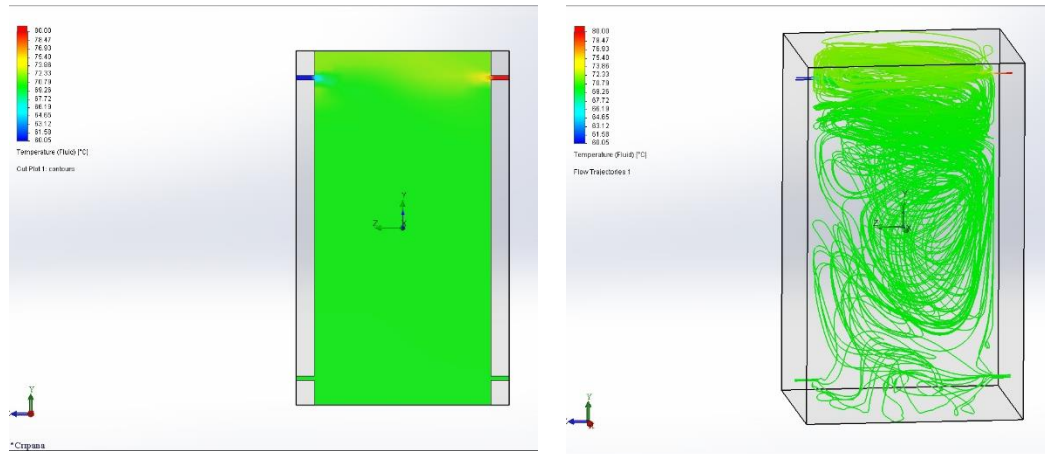


а) розподіл температур в баку акумулятора теплоти наприкінці процесу розрядки.

б) рух теплоносіїв в баку акумулятора теплоти наприкінці процесу зарядки.

Рисунок 1. Розподіл температур в баку акумулятора теплоти при паралельній схемі підключення

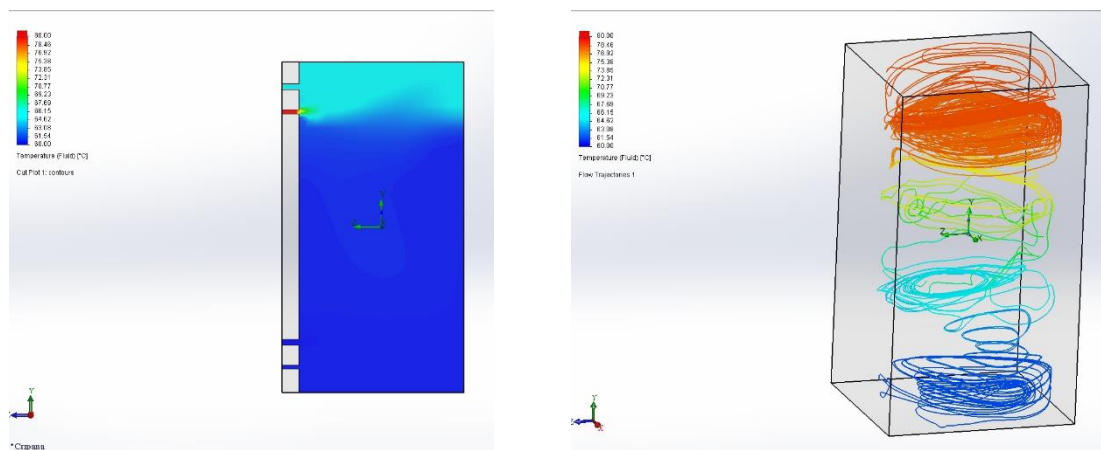




а) розподіл температур в баку акумулятора теплоти наприкінці процесу зарядки

б) рух теплоносіїв в баку акумулятора наприкінці процесу зарядки

Рисунок 2. Розподіл температур в баку акумулятора теплоти при перехресній схемі підключення



а) розподіл температур в баку акумулятора теплоти наприкінці процесу розрядки

б) рух теплоносіїв в баку акумулятора процесу зарядки

Рисунок 3. Розподіл температур в баку акумулятора теплоти при сумісній схемі підключення

В схемі із перехресним приєднанням теплоносіїв відбувається більш рівномірний розподіл температур в акумулюючому середовищі та більш тривалий процес зарядки акумулятора. При цьому слід відмітити більш прискорений процес зарядки акумулятора при паралельній схемі підключення теплоносіїв до акумулятора теплоти.

### Висновки

1. Враховуючі наведені обставини можна зробити висновок, що для узгодження роботи системи низькотемпературного опалення та споживачів рекомендовано встановлення тепломасообмінних установок, а саме акумуляторів тепла або буферних ємностей.

Виходячи із техніко-економічних обставин рекомендовано використовувати комбіновані системи низькотемпературного опалення з використанням альтернативних джерел тепла.

Слід зауважити, що ефективність роботи системи низькотемпературного опалення залежить від схем приєднання генераторів та споживачів теплоти до акумуляторів та повноти використання об'єму тепло-акумулюючого матеріалу. Для вирішення вказаного питання було проведене дослідження повноти використання теплоакумулюючого матеріалу при різних схемах приєднання споживачів та генераторів теплоти до акумуляторів

2. Аналіз результатів чисельного моделювання поля температур в тепломасообмінній установці при традиційних схемах приєднання теплоносіїв, коли подавальна магістраль приєднується до верхнього штуцера бака-акумулятора, показує менш ефективне використання об'єму акумулюючого матеріалу – синій колір відповідає незадіяному об'єму акумулюючого матеріалу. При перехресній схемі приєднання джерела та споживача теплоти – подавальна магістраль приєднується до нижнього штуцера бака-акумулятора, дозволяє досягти більш рівномірного використання об'єму теплоакумулюючого матеріалу, але при цьому зменшується максимальна температура в акумуляторі.

Застосування нижнього підключення подавальної магістралі дозволяє досягти більш інтенсивного перемішування тепло-акумулюючого матеріалу в акумуляторі, що, в свою чергу, впливає на рівномірний розподіл температур – співпадають напрями вільної та примусової конвекції, на відміну від варіанту з верхнім підключенням подавальної магістралі, коли відбувається розподіл температур рідини пошарово.

#### Список використаних джерел

1. Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки: Закон України від 11 липня 2001 р. № 2623-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2623-14> (дата звернення: 10.10.2021).

2. Про енергозбереження: Закон України від 1 липня 1994 р. №74/94. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94> (дата звернення: 10.10.2021).

3. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Біла книга енергетичної політики України «Безпека та конкурентоспроможність». Київ, 2015. 49 с.

4. Мацевитый Ю. М., Ганжа Н. Г., Хименко А. В. Оценка энергетической эффективности систем теплоаккумуляционного отопления административных зданий. *Энергосбережение, энергетика, аудит*. 2011 № 10. С. 9-16.



5. Денисова А. Е., Драганов Б. Х., Сироватка М. А., Герасимчук С. А. Комплексна геліоаккумуляційна і теплонасосна система теплопостачання в комунально-побутовому секторі. *Відновлювана енергетика*. 2012. № 2. С. 16-18.

6. Климчук О. А., Титар С. С., Шевчук В. І., Димитров О. Д. Альтернативні системи теплопостачання житлових будівель із використанням теплових насосів та акумуляторів тепла. *Управління проектами: інновації, не лінійність, синергетика*: збірник праць V Міжн. наук.-прак. конф. Одеса: ОДАБА, 2014. Т. 2. С. 102-105.

7. Бондарь И. А., Денисова А. Е. Сравнительная оценка энергетической эффективности теплонасосных установок для систем теплоснабжения с теплым полом. *Строительство и техногенная безопасность*: сб. науч. трудов. Симферополь, 2014. Вып. 52. С. 80-85.

8. Алимгазин А. Ш., Петин Ю. М., Кислов А. П. Пути повышения энергетической эффективности теплонасосных технологий в Республике Казахстан. *Вестник ПГУ им. С. Торайгырова. Сер. Энергетика*. 2010. № 1. С. 28-42.

9. Сотникова О. А., Турбин В. С., Григорьев В. А. Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения. *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК)*. 2003. № 5. С. 40–45.

10. Бабаев Б. Д. Сравнительные характеристики различных типов аккумуляторов тепла, перспективное направления разработок новых методов и устройств для аккумуляирования тепловой энергии. *Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов*: материалы VI Школы молодых ученых им. Э. Э. Шпильрайна (г. Махачкала, 23–26 сентября 2013 г.). Махачкала, 2013. С. 125-137.

11. Мазуренко А. С., Климчук А. А., Юрковский С. Ю., Омеко Р. В. Development of the scheme of combined heating system using seasonal storage of heat from solar plants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 1, № 8 (73). P. 15-20. DOI:10.15587/1729-4061.2015.36902.

12. Ададулов Е. А. Повышение эффективности использования аккумуляторов теплоты с возобновляемыми источниками энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.08. Краснодар, 2004. 178 с.

13. Климчук О. А., Лужанська Г. В. Узгодження режимів генерації та споживання теплоти. *Сучасні проблеми інноваційного розвитку електричної інженерії*: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (м. Мелітополь, 05-25 квітня 2021 р.) / ТДАТУ. Мелітополь, 2021. С. 49-50.

14. Соренсен Б. Преобразование, передача и аккумуляирование энергии: Учебно-справочное руководство. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 296 с.





15. Operation optimization of integrated energy systems based on heat storage characteristics of heating network / E. Pan et al. *Energy Science & Engineering*. 2021. Vol. 9, № 2. P. 223-238. DOI: 10.21203/rs.3.rs-37009/v1.

16. Лужанська Г. В., Іванова Л. В., Радченко М. В., Васильченко О. І. Особливості методів візуалізації енергетичних процесів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей ХХІХ міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2021* (м. Харків, 18-20 травня 2021 р.): у 5 ч. Ч. II. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. С. 189.

17. Вдосконалення систем теплолокалізації на засадах енергозбереження / А. Є. Денисова та ін. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів*. Харків, 2020. № 6. С. 3–11. DOI: 10.20998/2220-4784.2020.06.01.

18. Methodology of calculation of multiplex heat exchange apparatus with cross flow and mixing in heat carriers / A. M. Ganzha et al. *Journal of new technologies in environmental science*. 2018. Vol. 2, № 1. P. 26–35.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2021 р.

**O. Klymchuk<sup>1</sup>, A. Luzhanska<sup>1</sup>, V. Kandieieva<sup>1</sup>, I. Aksyonova<sup>2</sup>, I. Borokhov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Odessa polytechnic state university

<sup>2</sup>Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

<sup>3</sup>Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

## **WAYS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE OPERATION OF HEAT AND MASS EXCHANGE UNITS OF LOW TEMPERATURE COMBINED HEATING SYSTEMS WHEN USING ALTERNATIVE ENERGY SOURCES**

### *Summary*

The urgent problem of the modern economy of Ukraine in the conditions of the economic crisis is the rational use of the fuel and energy resources of our country. One of the ways to solve this problem is energy storage. According to the direction of the Energy Strategy of the state for the period up to 2030, the development and implementation of combined highly efficient heat pump systems for low-temperature heating based on alternative energy sources using heat accumulators are becoming increasingly important.

An important step in the design of a low temperature heating system is the selection of the type of heat pump and the capacity of the heat accumulator.

To intensify the process of introducing innovative energy technologies, it is necessary to increase their profitability by significantly increasing the share of replacing traditional primary energy resources with alternative energy sources.

The issues of joint effective use of the most common combinations of joint use of various heat generators in the proposed systems are considered.

There are several schemes for the operation of heat accumulators for various types of coolant connection: parallel, cross, joint.



In order to study the processes in heat exchange units of combined low-temperature heating systems with different schemes for connecting the source and consumer of heat, the SolidWorks software product was used. Using the Flow Simulation software package based on the SolidWorks software, the results of numerical modeling of thermal processes in the heat accumulator with visualization of the temperature field for the specified connection schemes were obtained

In the course of the studies carried out on the existing schemes for the operation of batteries for various types of connection of the coolant, it was found that the use of a cross connection scheme for a heat accumulator installation is the most effective in a combined low-temperature heating system.

Considering the above circumstances, it can be concluded that in order to harmonize the operation of the low-temperature heating system and consumers, it is recommended to install heat exchange units, namely heat accumulators or buffer tanks according to a cross-circuit connection of the coolant, while it is recommended to use combined low-temperature heating systems using alternative heat sources.

**Key words:** heat accumulators, combined low temperature heating system, heat pump

**А. А. Климчук<sup>1</sup>, А. В. Лужанская<sup>1</sup>, В. В. Кандеева<sup>1</sup>,  
И. Н. Аксенова<sup>2</sup>, И. В. Борохов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Государственный университет «Одесская политехника»

<sup>2</sup>Одесская государственная академия строительства и архитектуры

<sup>3</sup>Таврический государственный агротехнологический университет  
имени Дмитрия Моторного

## **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ УСТАНОВОК СИСТЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КОМБИНОВАННОГО ОТОПЛЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

### **Аннотация**

Актуальной проблемой экономики Украины в условиях экономического кризиса является рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Одним из путей решения является аккумулирование энергии. Согласно направлению Энергетической стратегии все большую актуальность приобретают разработка и внедрение комбинированных высокоэффективных систем низкотемпературного отопления на основе альтернативных источников энергии с использованием тепло аккумуляторов.

Рассмотрены вопросы совместного эффективного использования наиболее распространенных комбинаций совместного использования различных генераторов теплоты в предложенных системах.

Выполнены исследования существующих схем работы аккумуляторов по различным типам присоединения теплоносителя. В результате получено, что применение перекрестной схемы присоединения теплообменной установки в системе комбинированного низкотемпературного отопления позволяет добиться максимально эффекта.

**Ключевые слова:** тепловые аккумуляторы, комбинированная система низкотемпературного отопления, тепловой насос.