

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

АНТИПОВ ЄВГЕН ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.311.1: 620.92

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ
ТА КОМБІНОВАНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Горобець Валерій Григорович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
завідувач кафедри теплоенергетики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НААН
Снежкін Юрій Федорович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
в. о. директора, завідувач відділу нестационарного
тепломасопереносу в процесах сушіння

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Герасимчук Юрій Васильович,
Національний науковий центр «Інститут механізації
та електрифікації сільського господарства» НААН,
завідувач відділу електрифікації та автоматизації

Захист відбудеться «29» березня 2016 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Генерала Родимцева, 19, навчальний корпус № 1, кімната 97

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розісланий «27» лютого 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Обмеженість традиційних паливно-енергетичних ресурсів (газоподібного, рідкого й твердого палива), постійне зростання цін на них, а також негативний вплив продуктів їх згоряння на навколишнє середовище, свідчать про необхідність створення й практичного використання комбінованих систем енергозабезпечення споживачів, у тому числі й із альтернативними джерелами енергії. Однак, використання енергії цих джерел ускладнюється стохастичним характером її надходження, унаслідок чого постає потреба в забезпеченні безперебійної роботи вказаних систем. Стабільність та надійність функціонування таких комбінованих систем можуть бути досягнуті як за рахунок включення до їх складу традиційних джерел живлення, так і з використанням акумуляторів енергії різних типів, що дає змогу не лише підвищити ефективність використання теплової та електричної енергії, а й знизити її вартість.

З усіх типів існуючих конструкцій теплоакумуляторів найбільш перспективними є акумулятори теплоти з фазовими або хімічними перетвореннями акумулюючого матеріалу, які дозволяють забезпечити високу щільність накопиченої енергії і стабільну температуру на виході з теплового акумулятора. До недоліків таких акумуляційних апаратів можна віднести їх високу вартість та трудомісткість виготовлення теплообмінної поверхні.

Одним з можливих шляхів удосконалення такого обладнання, як найбільш перспективний, варто відзначити варіант створення акумулятора енергії, в якому поєднані ємнісне та акумулювання теплоти фазових перетворень акумулюючого матеріалу з використанням двох джерел первинної енергії, а саме: теплової та електричної. За такого підходу вдається не лише підвищити ступінь накопичення енергії, але й зменшити виробничі площі, що займає акумуляційне обладнання, скоротити енергетичні затрати на процес енергозабезпечення споживачів в цілому. Таким чином, з'являється можливість знизити вартість акумульованої енергії порівняно з використанням декількох окремих незалежних джерел енергії, способи накопичення енергії яких поєднані в такому обладнанні.

Відповідно до цього, виникає необхідність проведення фізичного моделювання процесів тепло- і масопереносу при акумулюванні енергії, що дасть змогу розробити нові або вдосконалити існуючі конструкції теплових акумуляторів. Окремою важливою задачею є створення комбінованих систем енергозабезпечення, що включають пристрої для акумулювання теплової та електричної енергії, з використанням альтернативних джерел енергії. Також, для здійснення вибору ефективних параметрів енергогенеруючого обладнання й акумуляторів енергії, важливим є встановлення енергетичних взаємозв'язків між компонентами такої системи. Вирішення зазначених задач є актуальним для забезпечення потреб у тепловій та електричній енергії побутових споживачів, індивідуальних фермерських господарств, житлових будинків котеджного типу тощо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Подані у роботі дослідження виконано на кафедрі теплоенергетики Національного університету біоресурсів і природокористування України відповідно до цільових програм Міністерства освіти і науки України за темою: «Система комплексного

енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел та комбінованих акумуляторів енергії», яка входить до складу державної тематики «Енергозберігаючі технології і калориметрія» (номер державної реєстрації 0109U007107), «Новітні акумулятори теплової енергії на основі фазоперехідних теплоакумуючих матеріалів» (номер державної реєстрації 0115U004845) та «Експериментальне дослідження, математичне моделювання і енергетична ефективність нових теплообмінних апаратів» (номер державної реєстрації 0114U002963).

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні ефективності процесу енергоживлення споживачів тепловою та електричною енергією шляхом розроблення системи комплексного енергозабезпечення із застосуванням альтернативних джерел та комбінованих акумуляторів енергії.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати існуючі систем енергоживлення та обґрунтувати необхідність розробки нової системи комплексного енергозабезпечення споживачів із застосуванням комбінованого акумулятора енергії, що базується на використанні енергії теплових та електричних джерел;

- розробити числову модель процесів тепло- і масопереносу в акумуляторі енергії та провести розрахунки параметрів акумулятора теплоти фазового переходу з використанням сучасних комп'ютерних програм;

- виготовити експериментальну установку й провести експериментальні дослідження процесів акумулювання теплової та електричної енергії для визначення ефективних конструктивних та робочих параметрів комбінованого акумулятора енергії;

- на основі числової реалізації моделі комбінованого акумулятора енергії оцінити узгодженість експериментальних даних із результатами числового моделювання;

- отримати вихідні параметри енергогенеруючого обладнання й акумуляторів теплової та електричної енергії для ефективного вибору компонентного складу системи комплексного енергозабезпечення споживачів;

- здійснити техніко-економічне обґрунтування ефективності роботи запропонованої системи із застосуванням альтернативних джерел та комбінованого акумулятора енергії розробленої конструкції.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення та акумулювання енергії альтернативних джерел в системі комплексного енергозабезпечення споживачів.

Предмет дослідження – залежність параметрів функціонування компонентів системи комплексного енергоживлення з комбінованими акумуляторами енергії та їх вплив на ефективність процесу енергозабезпечення споживачів.

Методи дослідження – експериментальні дослідження та числове моделювання процесів тепло- і масопереносу в акумуляторах енергії виконано за допомогою програм для дво- і тривимірного моделювання «COMSOL Multiphysics 3.5a», а процесів перетворення та акумулювання енергії в електротехнічній системі загалом – методом імітаційного моделювання, який реалізовано в програмному пакеті «Matlab Simulink».

Отримані результати перевірено експериментальними дослідженнями в лабораторних умовах. Показана прийнятна схожість результатів числового моделювання з експериментальними даними. Встановлено, що різниця між температурними показниками не перевищує 5 %. Обробка, аналіз та узагальнення дослідних даних і даних числового моделювання виконано за допомогою офісного додатку «Microsoft Office Excel» та програмного пакету «MathCad».

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в дисертації вперше:

- на основі закономірностей взаємовпливу теплових і електричних джерел енергії на процеси перетворення й накопичення енергії обґрунтовано можливість її комбінованого акумулювання в одному апараті;

- отримано залежність коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу від геометричних параметрів та потужності первинного джерела енергії, на основі якої запропоновано більш ефективну конструкцію комбінованого акумулятора енергії;

- визначено граничний радіус поширення теплоти для розміщення циліндричних джерел електричної та теплової енергії в корпусі комбінованого акумулятора енергії, що підвищує енергетичну ефективність робочих характеристик апарату;

- досліджено залежність робочих параметрів системи комплексного енергозабезпечення споживачів від теплофізичних процесів перетворення та акумулювання енергії.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновано систему комплексного енергозабезпечення побутових споживачів, яка включає як альтернативні, так і традиційні джерела й акумулятори теплової та електричної енергії, що дало змогу підвищити ефективність її роботи та знизити вартість отриманої теплової енергії на 52–66 %, електричної – на 40–50 %.

2. Для запропонованої системи комплексного енергозабезпечення споживачів отримано вихідні дані щодо вибору ефективних параметрів її компонентного складу енергогенеруючого обладнання й акумуляторів теплової та електричної енергії залежно від кліматичних умов розміщення й потужності споживача.

3. Розроблено вдосконалену конструкцію комбінованого акумулятора енергії, яка відрізняється від зразка-аналогу хвилеподібним дном і додатковим оснащенням багатоярусними електричними підігрівачами, що підвищує ефективність та стабільність енергозабезпечення споживачів на 15–20 %.

4. Отримано вихідні дані щодо вибору конструктивних параметрів комбінованого акумулятора енергії, на основі яких розроблено методику розрахунку та підготовлено практичні рекомендації з проектування нових конструкцій акумуляторів теплоти фазового переходу.

5. Результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи впроваджено в ПАТ «Акціонерне товариство «Південтрансенерго», а частина з них, як методичне забезпечення, використовується в навчальному процесі кафедри теплоенергетики Національного університету біоресурсів і природокористування України при викладанні дисциплін «Альтернативні джерела

енергії» та «Теплоенергетичні установки і системи» під час підготовки фахівців технічних спеціальностей.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу конструктивних особливостей існуючих акумуляційних апаратів та комбінованих систем енергоживлення, зокрема й від альтернативних джерел енергії [21]; розробленні та виготовленні комбінованого акумулятора енергії з використанням акумулюючих матеріалів фазового переходу [9, 16]; проведенні комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень процесів тепломасопереносу в об'ємі акумулюючого матеріалу фазового переходу залежно від режимів роботи акумулятора теплоти [13, 10, 11, 17, 18]; розробленні технічного рішення для інтенсифікації процесів теплообміну в акумуляторах теплоти фазового переходу, в тому числі й в акумулюючих матеріалах з низьким коефіцієнтом теплопровідності [19]; проведенні досліджень ефективності роботи комбінованого акумулятора енергії в складі запропонованої системи комплексного енергозабезпечення із застосуванням альтернативних джерел енергії [3, 4, 14, 15, 20, 22]; опрацюванні отриманих результатів та їх аналізі.

У наукових працях автора, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: проведення комп'ютерного моделювання процесів тепломасопереносу в об'ємі акумулюючого матеріалу акумулятора теплоти [5, 12]; розроблення методики розрахунку ефективних робочих та конструктивних параметрів акумулятора теплоти фазового переходу [6]; збір та опрацювання даних щодо величини втрат теплової енергії через огорожувальні конструкції опалювальних приміщень до та після їх термомодернізації [1, 7]; розроблення системи енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел енергії та теплових акумуляторів [2, 8].

Наведені у дисертаційній роботі результати числових та експериментальних досліджень отримано здобувачем самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та матеріали дисертаційних досліджень було викладено у доповідях та обговорено на: наукових конференціях Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ, 2012–2015 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених до 80-річчя заснування факультету енергетики і автоматики «Альтернативна енергетика, новітні електротехнології та інтелектуальні управляючі системи в АПК» (м. Київ, 25–26 жовтня 2012 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Виробництво екологічно безпечної сільськогосподарської продукції: проблеми та перспективи» (м. Ніжин, 10–11 жовтня 2013 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (м. Київ, 16–18 жовтня 2013 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції до 115-річчя заснування Національного університету біоресурсів і природокористування України «Енергетика та комп'ютерно-інформаційні технології» (м. Бережани, 30–31 жовтня 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції з нагоди 115-річчя заснування Національного університету біоресурсів і природокористування України «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 5–6 листопада 2013 р.); I та II Міжнародній науково-технічній

конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (м. Київ, 6–7 листопада 2013 р., 16–17 жовтня 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)» (м. Київ, 14–26 жовтня 2013 р., 15–20 квітня 2014 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 14–15 травня 2014 р.); XVII Міжнародній конференції «Теплотехника и энергетика в металлургии» (м. Дніпропетровськ, 7–9 жовтня 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні тенденції та перспективи розвитку збалансованого природокористування в агропромисловому виробництві» (м. Ніжин, 26–27 березня 2015 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (м. Херсон, 26–28 травня 2015 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції пам'яті І. І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України» (м. Київ, 10–14 червня 2015 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 22 наукових працях, у тому числі: 11 статтях у наукових фахових виданнях України, 2 статтях у наукових виданнях інших держав, 9 тезах наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 183 найменувань та 7 додатків. Загальний обсяг роботи становить 265 сторінок, у тому числі 167 сторінок основного друкованого тексту, який містить 65 рисунків і 27 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми з урахуванням сучасних проблем енергетики й екології, розглянуто зростаючу роль альтернативних джерел енергії, у першу чергу, сонячної, у нових технологіях та, зокрема, під час вирішення завдань енергозабезпечення, сформульовано мету й основні задачі дослідження, викладено наукову новизну, практичну цінність та показано особистий внесок здобувача. Подано відомості про апробацію результатів роботи, повноту викладення матеріалів в опублікованих роботах, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі «*Аналіз існуючих систем комбінованого використання джерел енергії та відомих конструкцій акумуляторів теплоти фазового переходу*» проаналізовано сучасний стан енергетичного сектору країни, існуючі варіанти систем комбінованого енергоживлення споживачів, зроблено огляд літературних джерел, опублікованих за темою дисертаційної роботи. Розглянуто базові підходи, використані в наведених публікаціях та зазначено основні недоліки відомих зразків акумуляційного обладнання та існуючих систем енергопостачання. У результаті проведеного аналізу обґрунтовано мету дослідження, яка полягає у підвищенні ефективності процесу енергоживлення споживачів шляхом розроблення нової системи комплексного енергозабезпечення тепловою та електричною енергією

з використанням як традиційних, так і альтернативних джерел та комбінованих акумуляторів надлишкової енергії вдосконаленої конструкції.

Проблема переходу від традиційних до альтернативних джерел енергоживлення промислових споживачів та житлово-комунального комплексу досліджена в роботах: Л. Брауна, Д. Крисвелла, Р. Лопеса, М. Махмуда, Д. С. Стребкова, П. П. Безруких, Б. В. Лукутіна, О. С. Попела, О. М. Юрченко, О. Л. Іваніна, І. М. Кирпатенко, О. І. Солов'я, В. М. Головка, С. О. Кудрі та інших. Відзначено, що найбільш універсальною для автономних систем енергозабезпечення, з точки зору енергетичного потенціалу й можливості його загальнодоступного використання на всій території України, є сонячна енергетика. Однак, як відомо, використання цієї енергії ускладнюється стохастичним характером її надходження, унаслідок чого виникає необхідність забезпечення безперервної роботи вказаних систем, яка може бути досягнута як за рахунок включення до їх складу традиційних джерел живлення, так і з використанням акумуляторів енергії різних типів. Тому, з усіх розглянутих варіантів схем енергозабезпечення споживачів, найбільший інтерес становить варіант комплексного енергоживлення споживача як від зовнішньої енергомережі, так і від джерел сонячної енергії з можливістю акумуляції теплової та електричної енергії.

На основі огляду наукових робіт та аналізу патентно-ліцензійної документації, розглянуто класифікацію та конструктивні особливості сучасних акумуляторів теплової енергії. Аналіз різних способів акумуляції виявив, що найбільш перспективним типом теплових акумуляторів є акумулятори теплоти фазового переходу періодичної дії. У працях вітчизняних та закордонних спеціалістів Н. Н. Карнаухова, В. В. Шульгіна, М. І. Куколева, С. Д. Гуліна, Н. В. Глухенко, А. А. Сорокіна, М. А. Россіхіна, О. Шатца, А. Пелліке, М. Куто та інших, виконано наукове обґрунтування та розроблено методику розрахунку акумуляторів теплоти фазового переходу капсульного типу. Разом з тим, на основі аналізу робіт В. Д. Александрова, В. С. Мартиновського, М. І. Куколева, Д. С. Адрова, І. В. Грицука, А. М. Гущина, Ю. Ф. Гутаревича та інших, можна зробити висновок про необхідність покращення умов «заряду» акумуляторів та вжиття заходів щодо інтенсифікації процесів як тепловідводу, так і зберігання теплової енергії в акумуляторах теплоти фазового переходу існуючих конструкцій. Відзначено, що ефективність роботи акумуляторів значно впливає на загальний ексергетичний коефіцієнт корисної дії всієї системи енергоживлення.

До того ж, на сьогодні, у наукових роботах відсутня детальна інформація щодо комплексних експериментальних досліджень процесів переносу енергії, які відбуваються під час фазових перетворень акумуляюючого матеріалу. Показано, що для їх опису використовують переважно інженерні методики, які базуються на напівемпіричних рівняннях подібності та інтегральних методах, але вони неспроможні повною мірою описати характер протікання того чи іншого процесу в умовах наближених до реальних, що призводить до хибних результатів.

Отже, узагальнюючи результати проведеного літературно-патентного аналізу щодо підвищення ефективності систем енергозабезпечення споживачів, можна зробити висновок, що одним з найбільш перспективних напрямів акумуляції теплової та електричної енергії є варіант створення акумуляторів теплоти, в яких

поєднані як різні принципи акумулювання, так і використання двох джерел первинної енергії, а саме: теплової та електричної. Таке технічне рішення значно розширює як сферу практичної реалізації апаратів для акумулювання енергії, так і можливість розроблення нових систем комплексного енергозабезпечення в цілому. Недостатнє експериментальне вивчення цих апаратів та систем, свідчить про необхідність дослідження процесів перетворення та акумулювання енергії, встановлення енергетичних взаємозв'язків між складовими компонентами такої системи, вдосконалення існуючої або розроблення нової методики розрахунку та принципів побудови акумуляторів теплової та електричної енергії. Усе вищезазначене визначає напрям для проведення теоретичних та експериментальних досліджень, обґрунтовує актуальність дисертаційної роботи, з якої сформульовано мету та задачі подальших досліджень.

У другому розділі «Комп'ютерне моделювання процесів тепломасообміну при фазових переходах акумулюючого матеріалу» проведено комп'ютерне моделювання процесів тепло- і масопереносу при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу навколо декількох циліндричних джерел теплоти з використанням пакета програм кінцево-елементного аналізу COMSOL Multiphysics 3.5a на прикладі парафіну. Досліджено основні закономірності вільноконвективного теплообміну під час плавлення акумулюючого матеріалу, інтенсивність процесів переносу в різні моменти часу та отримано загальну картину плавлення теплоакumuлюючого матеріалу навколо циліндричних джерел теплоти з гладкою поверхнею. Визначено вплив розмірів та геометрії розміщення теплообмінної поверхні в об'ємі матеріалу на динаміку та напрям поширення конвективних теплових потоків. Отримано значення граничного радіуса поширення теплоти в об'ємі акумулюючого матеріалу при якому процес акумулювання теплоти на одиницю маси за одиницю часу є максимальним. Це уможливило визначення конструктивних та робочих параметрів експериментальної установки.

На основі аналізу конструкцій існуючих акумуляційних апаратів в середовищі

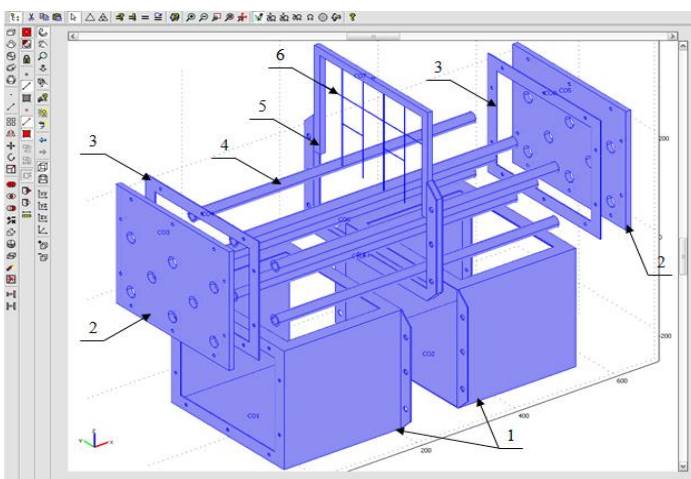


Рис. 1. Аксонометричний вигляд моделі акумулятора теплоти: 1 – корпус; 2 – торцеві кришки; 3 – гумові прокладки; 4 – трубний пучок; 5 – рухома рамка; 6 – «температурна сітка».

COMSOL Multiphysics 3.5a розроблено аксонометричну модель акумулятора теплоти фазового переходу досліджуваної конструкції (рис. 1). Вважаємо, що теплоносій надходить в акумулятор і рухається вздовж нагрівальних труб, віддаючи або поглинаючи при цьому теплову енергію, яка накопичується чи відбирається від акумулюючого матеріалу.

Математична модель процесів тепло- і масопереносу при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу включає в себе рівняння Нав'є-Стокса та рівняння конвективного теплопереносу:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \rho w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial \rho w_x}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w_x}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial \rho w_y}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \rho w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial \rho w_y}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho w_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho w_y}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \pm Q_s(x, y), \quad (3)$$

де τ – час, с; x, y – декартові координати, м; w_x і w_y – відповідно складові швидкості матеріалу розплаву вздовж осі Ox та Oy , м/с; T – температура, °С; p – тиск, Па; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; ρ – густина середовища, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; Q – потужність джерела (стоку) теплоти, Вт; s – поверхня фазового перетворення.

При моделюванні процесів тепло- і масопереносу прийнято такі припущення: корпус акумулятора теплоізолюваний і теплові втрати в навколишнє середовище відсутні; початкова температура по всьому об'єму акумулюючого матеріалу однакова; температура поверхні циліндричних джерел (стоків) теплоти вибирається з умови теплового балансу між теплою, отриманою теплоакумулюючим матеріалом і переданою в матеріал від теплових джерел (стоків). На границі поділу фаз враховується теплота, яка поглинається (виділяється) при плавленні (кристалізації) акумулюючого матеріалу.

При цьому початкові та граничні умови мають вигляд:

- у початковий момент часу:

$$T(x, y, \tau = 0) = T_0, \quad (4)$$

де T_0 – початкова температура теплоакумулюючого матеріалу, °С;

- на поверхні корпусу:

$$\left. \frac{dT}{dn} \right|_{s,c} = 0, \quad (5)$$

де s, c – індекс, який означає границі стінок акумулятора теплоти в заданій області; n – нормаль до поверхні корпусу;

- на поверхні циліндричних джерел теплоти:

$$T_s(x, y) = T_{s,t}, \quad (6)$$

де $T_{s,t}$ – температура на поверхні теплових джерел (стоків), °С.

Як акумулюючий матеріал обрано парафін марки Т-3, з температурою фазового перетворення $T_\phi = 54 \div 56$ °С.

При проведенні числових розрахунків теплопереносу в області твердої фази акумулюючого матеріалу було використано рівняння (3), в якому приймалося, що $w_x = 0$, $w_y = 0$ і конвективні члени були відсутні.

У результаті проведеного числового моделювання встановлено наявність трьох стадій плавлення теплоакумулюючого матеріалу: в першій стадії відбувається перенос теплоти від теплових джерел до матеріалу кондуктивним шляхом; у другій стадії – конвективним шляхом, який супроводжується інтенсивним плавленням акумулюючого матеріалу; третя стадія характеризується перегрівом розплавленої

маси матеріалу. При цьому, виявлено наявність зон низької швидкості плавлення акумулюючого матеріалу, який знаходиться під нижнім рядом теплових джерел. Відмінність значень температур на початковій і кінцевій стадії плавлення в об'ємах матеріалу верхнього та нижнього рівнів не перевищує $\pm 5 \div 7$ °C (рис. 2). Задля кращого прогріву акумулюючого матеріалу в нижніх областях та визначення оптимальних відстаней між нагрівальними елементами проведено серію модельних розрахунків, в яких змінювалися розміри та геометрія розташування теплових джерел в об'ємі матеріалу. В результаті числових розрахунків знайдено граничну відстань (радіус) між тепловими джерелами, що дало змогу зменшити масогабаритні показники акумулятора теплоти та підвищити його акумуляційну здатність. Для різних параметрів циліндричної теплообмінної поверхні отримано значення граничного радіуса R радіального поширення теплоти в об'ємі акумулюючого матеріалу, який, наприклад, для парафіну, при діаметрі нагрівальної труби $d_3 = 21,25$ мм, становить $R = 30$ мм.

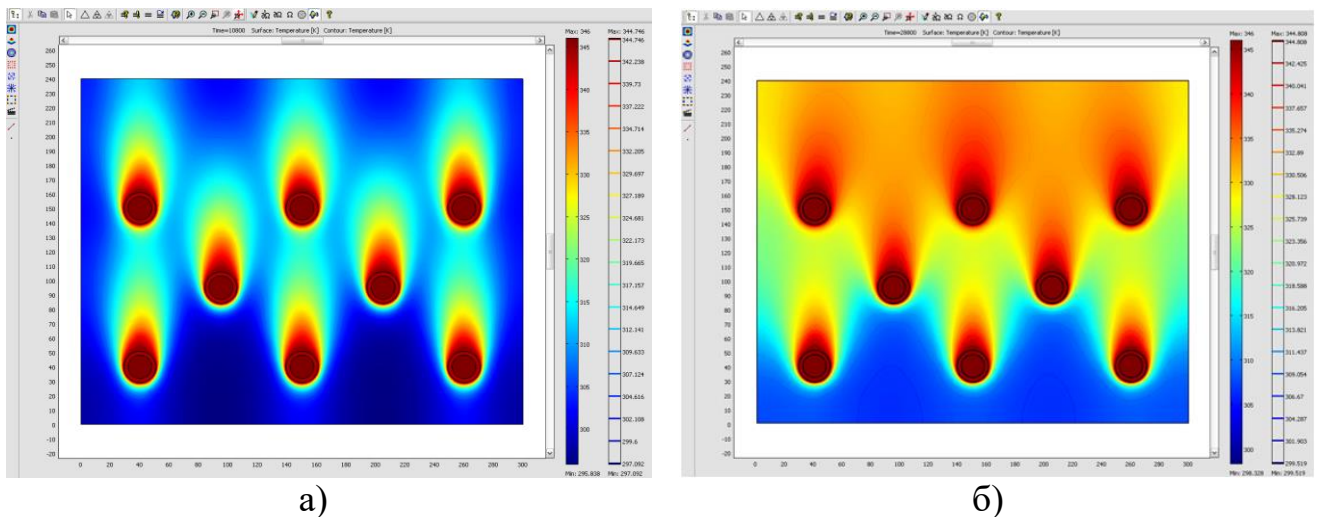


Рис. 2. Температурні поля в поперечному перерізі об'єму акумулюючого матеріалу досліджуваної конструкції акумулятора теплоти, через: а – 10800 с; б – 28800 с.

Аналіз результатів проведеного числового моделювання дає змогу зробити такий висновок: *розміщення нижнього ряду нагрівальних елементів від дна та стінок корпусу акумулятора, слід виконувати на відстані, яка не перевищує значення граничного (кінцевого) радіуса R .*

У третьому розділі «*Експериментальне дослідження процесів теплообміну та їх вплив на ефективність роботи акумулятора теплоти фазового переходу*» наведено результати експериментальних досліджень процесів переносу теплоти під час плавлення/кристалізації акумулюючого матеріалу (парафіну) навколо декількох циліндричних джерел теплоти з гладкою поверхнею. Викладено методику проведення експериментальних досліджень та оцінки похибки вимірювань. Проведено опрацювання отриманих результатів і встановлено ступінь адекватності проведеного числового моделювання процесів тепло- і масопереносу при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу.

Експеримент виконано на розробленій автором експериментальній установці (рис. 3), яка складається з напірного бака-акумулятора для води δ з резервним

електронагрівачем (ТЕНом) 10, та вакуумного сонячного колектора 4, які є контуром «зарядки» дослідного модуля 13, термоманометрів 11, витратоміра теплоносія 17, групи безпеки 19, запірної арматури та діючої макета системи опалення «тепла підлога» 23 з площею 10 м², який є контуром «розрядки» дослідного модуля. Всі зазначені елементи з'єднані між собою трубопроводами та обвідними лініями, що дає змогу комбінувати різні схеми роботи установки. Система автоматичного управління та контролю за основними робочими параметрами (тиск, температура) в контурах установки, яка виконана на базі блоку цифрового USB-термометра серії MP707R, забезпечує нагрівання або охолодження акумулюючого матеріалу дослідного модуля з одночасним підтриманням заданої температури теплоносія з подальшою реєстрацією та візуалізацією отриманих результатів і контролем параметрів у режимі on-line.

Для вимірювання температур на поверхні циліндричних джерел теплоти, в об'ємі акумулюючого матеріалу, а також температур теплоносіїв та навколишнього середовища використано цифрові датчики температури типу Dallas DS18B20.

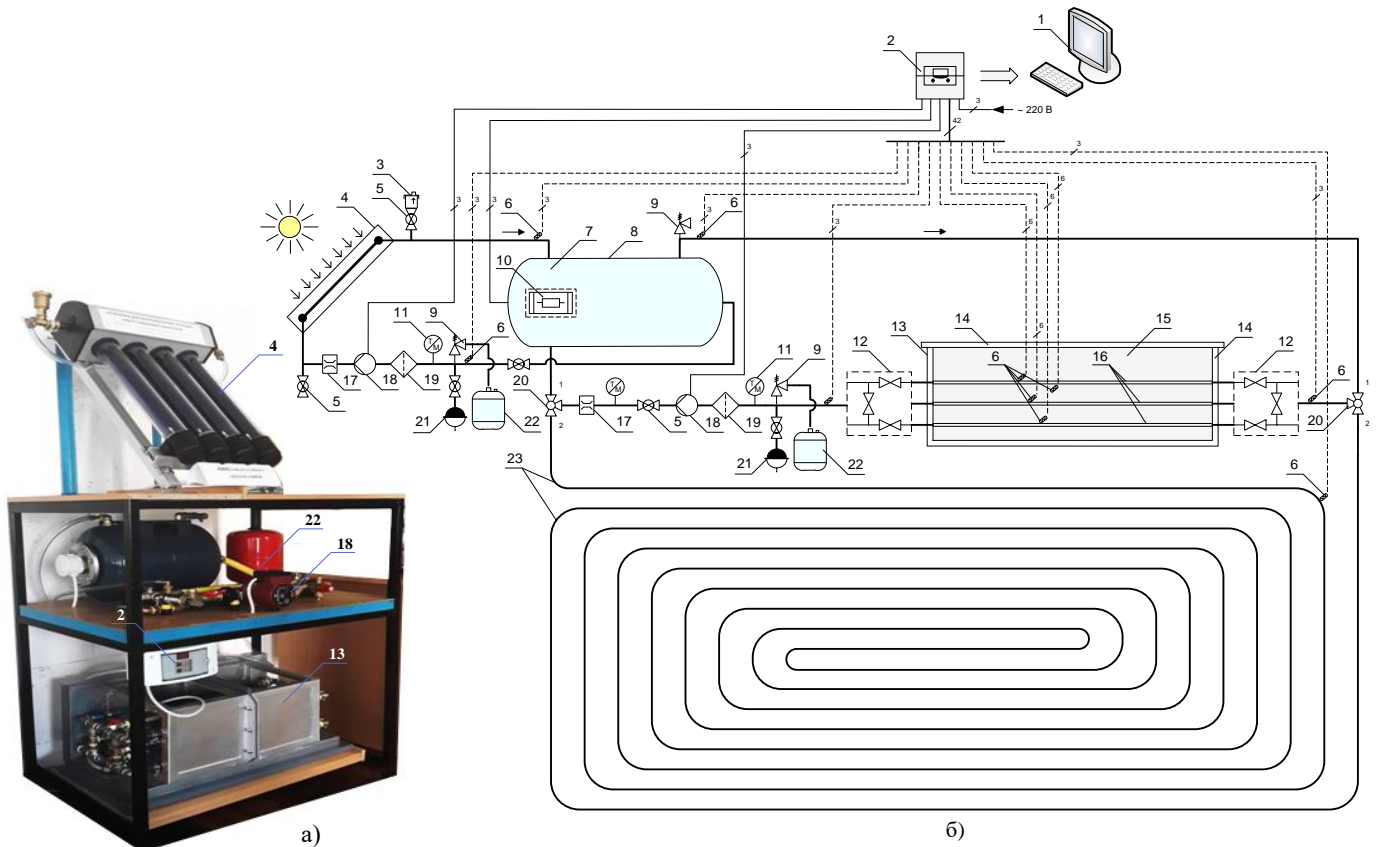


Рис. 3. Загальний вигляд (а) та гідравлічна схема (б) експериментальної установки: 1 – комп'ютер; 2 – аналого-цифровий перетворювач; 3 – повітря-спускник; 4 – вакуумний геліоколектор; 5 – шаровий вентиль; 6 – накладний датчик температури; 7 – теплообмінник; 8 – напірний бак-акумулятор; 9 – запобіжний (скидний) клапан; 10 – дублююче джерело підігріву (ТЕН); 11 – термоманометр; 12 – розподільний колектор; 13 – дослідний модуль; 14 – шар теплової ізоляції; 15 – акумулюючий матеріал; 16 – трубний пучок; 17 – витратомір; 18 – циркуляційний насос; 19 – сітчастий фільтр; 20 – триходовий вентиль; 21 – розширювальний бак; 22 – буферна ємність; 23 – контур системи опалення «тепла підлога».

Похибка вимірювань, яка визначена технічними параметрами обладнання, знаходилась в межах $\pm 0,5$ °С.

Основним елементом експериментальної установки є дослідний модуль (рис. 4), який являє собою виготовлену із сталі, заповнену твердим акумулюючим матеріалом фазового переходу, горизонтально орієнтовану ємність (корпус) у формі паралелепіпеда: заввишки $H = 240$ мм, завдовжки $L = 500$ мм, завширшки $B = 300$ мм. Для забезпечення умови радіального поширення теплоти в масиві акумулюючого матеріалу, за умовний час роботи апарата $\tau \approx 28800$ с, у межах $R \leq 40$ мм, як горизонтальні циліндричні джерела теплоти використано трубний пучок, який складається з 8 сталевих труб ($d_3 = 21,3 \times 2,8$ мм) розташованих по центру ємності в рівномірному шаховому порядку паралельно до дна корпусу модуля. Система запірної арматури дає змогу комбінувати різні робочі варіанти розташування нагрівальних труб у пучку: шахове або коридорне.

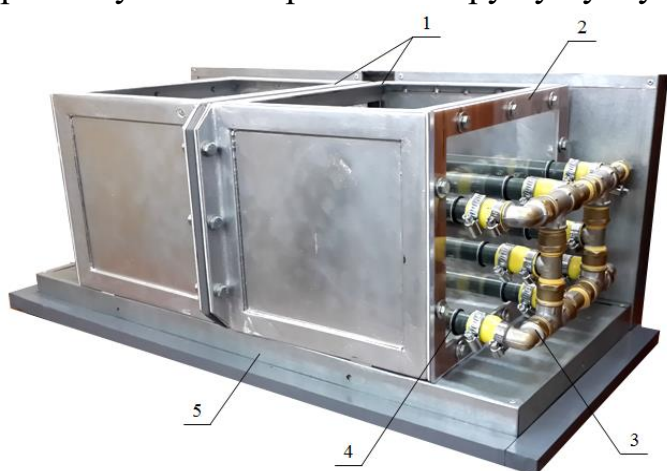


Рис. 4. Зовнішній вигляд дослідного модуля: 1 – розбірний корпус; 2 – торцева кришка; 3 – розподільний колектор; 4 – трубний пучок; 5 – теплоізоляційна панель.

На основі опрацювання відео- та фотофайлів, отримано профілі плавлення «тверде тіло – розплав» для різних моментів часу (рис. 5).

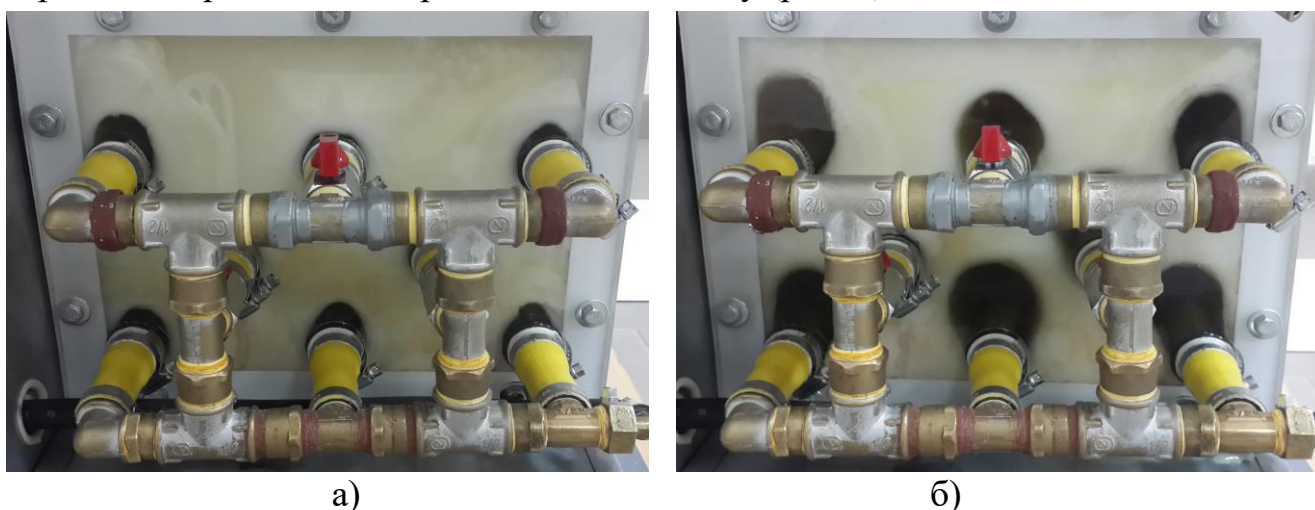


Рис. 5. Зміна профілів плавлення «тверде тіло – розплав» у часі: а – через 30 хв; б – 180 хв.

Як акумулюючий матеріал використано парафін марки Т-3. Маса парафіну в робочій камері $M_{там} = 26,1$ кг. Теплофізичні властивості акумулюючого матеріалу визначали за результатами спеціальних лабораторних досліджень, а теплоносія (води) – на основі відомих табличних значень.

За досліджувані фактори впливу вибрано такі: температура та швидкість руху теплоносія. Як параметри оптимізації: коефіцієнт корисного використання маси акумулюючого матеріалу та ступінь прогріву матеріалу нижніх рівнів.

Аналіз рис. 5 свідчить про наявність декількох різних фаз плавлення. У першій фазі перенесення тепла від джерела до межі поділу фаз здійснюється за рахунок кондуктивної складової теплового потоку, у другій та третій – конвективної.

Виявлено, що для другої фази плавлення характерним є максимальне значення приросту маси розплавленої речовини за одиницю часу. Третя фаза характеризується сповільненням приросту маси розплаву в нижній частині робочого об'єму, де спостерігається поява зон низької швидкості плавлення акумулюючого матеріалу, названих далі «застійними зонами», температура яких на 10–12 % нижча, ніж в області інтенсивних циркуляційних течій рідини (рис. 6). При цьому, велика кількість теплоти витрачається на перегрів розплавленого об'єму матеріалу у верхній частині теплоакумулятора. Тривалість такого «перегріву» становить щонайменше 25 % від загального часу роботи акумулятора в режимі «заряд».

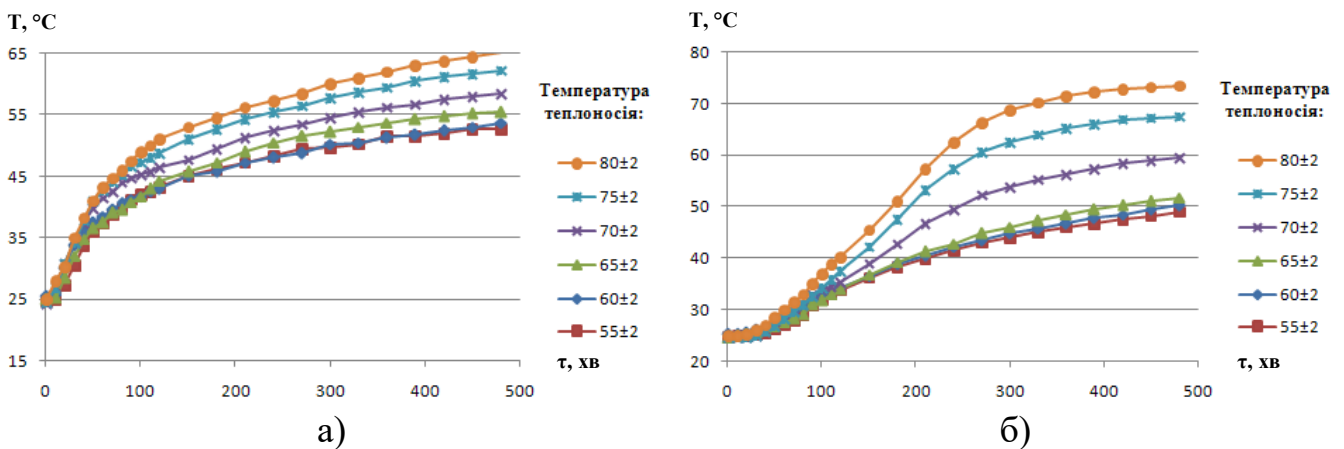


Рис. 6. Температура об'єму акумулюючого матеріалу, при різних значеннях температур теплоносія на вході: а – у «застійних зонах»; б – у розплаві матеріалу.

Робота апарата в режимі «розряд» на навантаження системи опалення «тепла підлога» (рис. 7), дала змогу виявити такі закономірності: чим нижча температура теплоносія (за постійної температури акумулюючого матеріалу в початковий період роботи апарата), тим гірше відбирається акумульована теплота з об'єму, не дивлячись на те, що температурний напір ($T_{кр} - T_{вх.в}$) зростає.

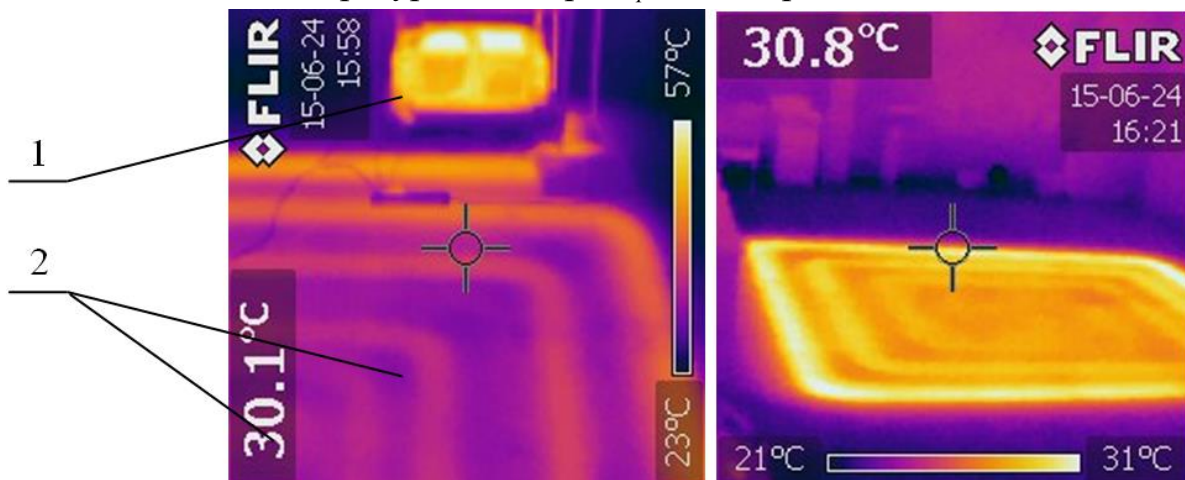


Рис. 7. Тепловізійна зйомка роботи акумулятора теплоти в режимі «розряд»: 1 – дослідний модуль; 2 – діючий макет системи опалення «тепла підлога».

Встановлено, що за низьких значень температури теплоносія відразу ж починають кристалізуватися прилягаючі до джерела теплоти шари матеріалу. При цьому, температура глибинних шарів на 27 % вища від температури шару закристалізованого матеріалу. Спостерігається як зниження теплового потоку, так і, відповідно, падіння коефіцієнту тепловіддачі під час «розряду» теплоаккумулятора.

Отримана детальна інформація про температурний розподіл в об'ємі робочого матеріалу дає змогу простежити зміну середньооб'ємних температур (θ) у рідкій і твердій фазах, від числа Фур'є (Fo), які представлено на рис. 8. Аналіз отриманих кривих свідчить про наявність трьох фаз плавлення та двох періодів кристалізації. В останньому випадку, перенос теплоти здійснюється кондуктивним шляхом та залежить від величини термічного опору δ_p/λ_p між джерелом і межею поділу рідкої та твердої фаз.

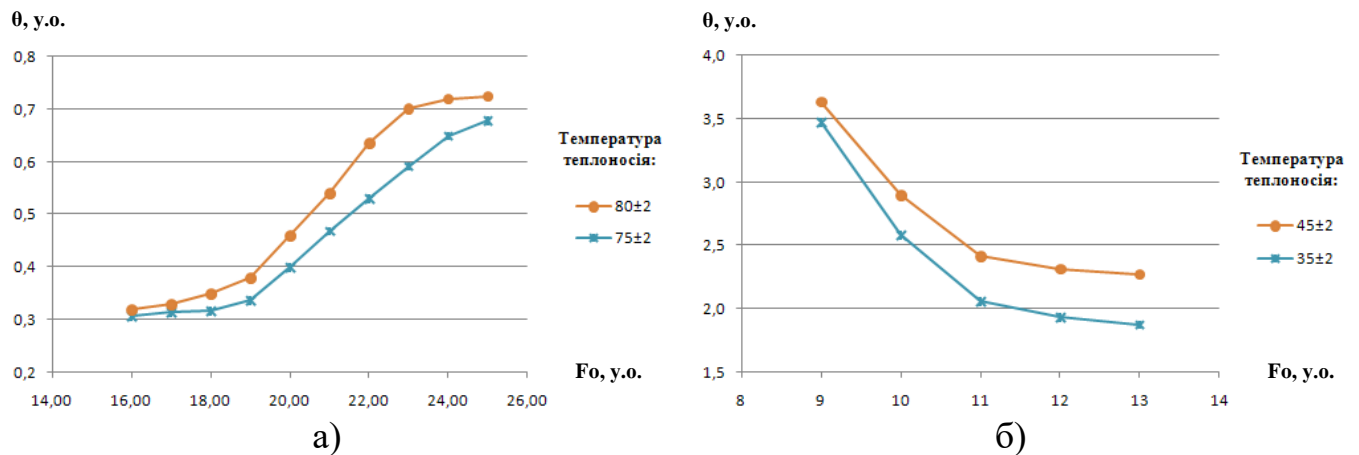


Рис. 8. Залежність середньооб'ємної температури (θ) від параметра Фур'є (Fo) під час плавлення (а) та кристалізації (б) акумулюючого матеріалу.

Співставлення й аналіз одержаних результатів числового моделювання (характер розподілу червоних кривих 1 і 3 на рис. 9) та експериментальних досліджень (криві 2 та 4) показав, що різниця між отриманими даними для температур під час плавлення (криві 1 та 2) теплоакumuлюючого матеріалу не перевищує 3 %, а під час його кристалізації – не більше 5 % (розподіл кривих 3 та 4 на рис. 9).

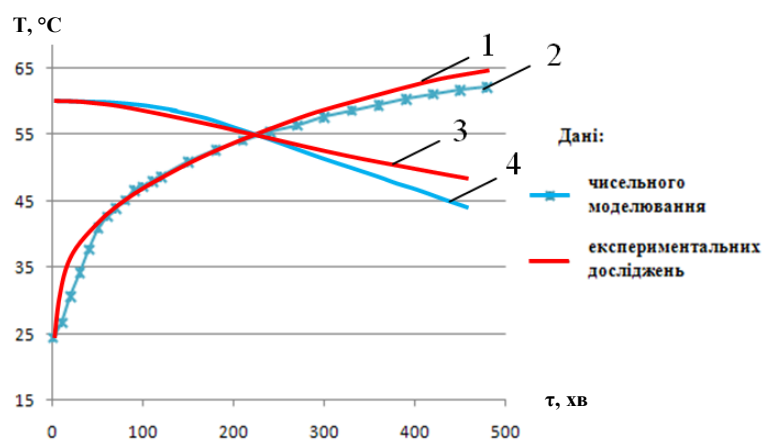


Рис. 9. Зіставлення результатів числового моделювання (1, 3) з дослідними даними (2, 4).

У підсумку, проведені експериментальні дослідження, підтвердили результати числового моделювання, на основі яких обґрунтовано необхідність розміщення нижнього ряду нагрівальних елементів від дна та стінок корпусу акумулятора, на осьовій відстані, яка дорівнює величині граничного радіусу R . Встановлено, що перевищення цієї величини на 20 % призводить до зменшення коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу на 7 %. Зазначений факт

уможливило мінімізацію застійних зон під час акумуляції теплової енергії та зменшення часу «зарядки» теплоакумулятора на 15–20 %.

У четвертому розділі *«Розробка засобів для інтенсифікації процесів теплообміну та методики розрахунку оптимальних параметрів акумуляторів теплоти на основі акумулюючих матеріалів фазового переходу»* розроблено технічне рішення для поліпшення розрядних характеристик дослідного зразка комбінованого акумулятора енергії вдосконаленої конструкції. Наведено результати числового моделювання впливу додаткових електричних підігрівачів теплообмінної поверхні на інтенсифікацію процесу відбору акумульованої енергії. Отримано оптимальні відстані розміщення теплообмінних поверхонь всередині корпусу акумулятора теплоти, а також їх габаритні характеристики. Розроблено методику розрахунку основних конструктивних та робочих параметрів акумулятора теплоти фазового переходу та проведено ексергетичний аналіз ефективності даної конструкції.

Задля зменшення об'єму зон низької швидкості плавлення та підвищення коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу запропоновано більш ефективну конструкцію акумулятора теплоти фазового переходу, яка має конструктивні зміни у вигляді хвилеподібного дна. Разом з тим, для вдосконалення механізму відбору акумульованої теплоти від акумулюючого матеріалу фазового переходу, використано додаткові джерела внутрішнього підігріву акумулюючого матеріалу на основі саморегулюючих електронагрівних проводів (рис. 10).

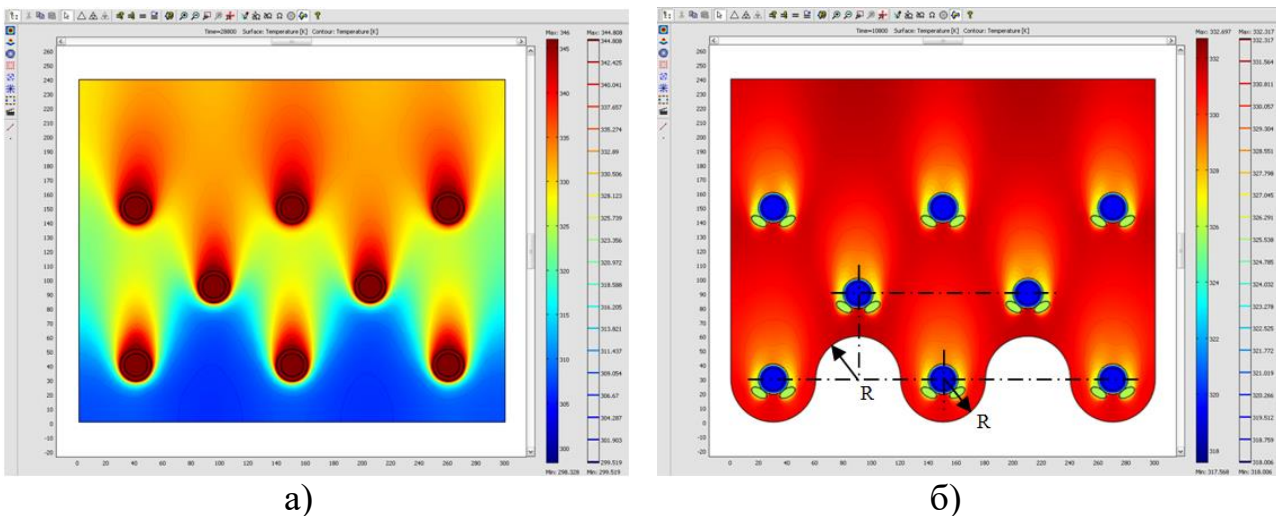


Рис. 10. Температурні поля в поперечному перерізі об'єму акумулюючого матеріалу досліджуваної (а) та вдосконаленої (б) конструкції акумулятора теплоти з нагрівальними елементами.

Порівняльний аналіз досліджуваної та вдосконаленої конструкції акумулятора теплоти свідчить, що температура акумулюючого матеріалу в нижній частині стінки корпусу апарата, відповідно, на 7 та 15 % вища, ніж в аналогічному об'ємі матеріалу акумулятора теплоти попередньої конструкції з плоским дном. Визначено, що встановлення додаткових електричних нагрівальних елементів, забезпечило: підвищення ефективності відбору теплоти на 8–10 %, зменшення масогабаритних показників апарата на 10–15 %, зростання коефіцієнта корисного використання маси акумулюючого матеріалу на 36 % та збільшення тривалості роботи апарата в режимі

«розряд» на 86 % за однакової теплової потужності зі зразком-аналогом.

На основі числових розрахунків процесів тепло- і масопереносу в акумуляторі теплоти вдосконаленої конструкції встановлено параболічну залежність між граничним радіусом R радіального поширення теплоти в масиві акумулюючого матеріалу та геометричними параметрами теплообмінної поверхні – зовнішнім діаметром d_3 нагрівальної труби $1,45d_{mp.3} \geq R \geq 1,25d_{mp.3}$, що уможливило проведення «зарядки» і «розрядки» апарата з максимальною ефективністю.

У результаті, розроблено методику розрахунку та підготовлено практичні рекомендації щодо вибору конструктивних параметрів акумулятора теплоти фазового переходу, які можуть бути використані під час розроблення нових конструкцій таких апаратів.

У п'ятому розділі «Розробка системи комплексного енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел та комбінованих акумуляторів енергії» запропоновано систему комплексного енергозабезпечення споживачів від енергії традиційних і альтернативних джерел із використанням акумуляторів електричної та теплової енергії. На основі алгоритмів імітації поновлювальних джерел та складових компонентів цього комплексу створено імітаційну модель такої системи для дослідження її робочих параметрів в умовах практичного застосування. Проведено попередній техніко-економічний аналіз доцільності її впровадження.

На рис. 11 подано функціональну схему запропонованої системи комплексного енергозабезпечення споживачів, яка базується на використанні енергії сонячного випромінювання та/або електричної мережі з можливістю накопичення її надлишку в акумуляторах електричної та теплової енергії вдосконаленої конструкції. Застосування даної системи передбачається в місцях, де перетворювачі сонячної енергії є основним джерелом, а електрична мережа – допоміжним.

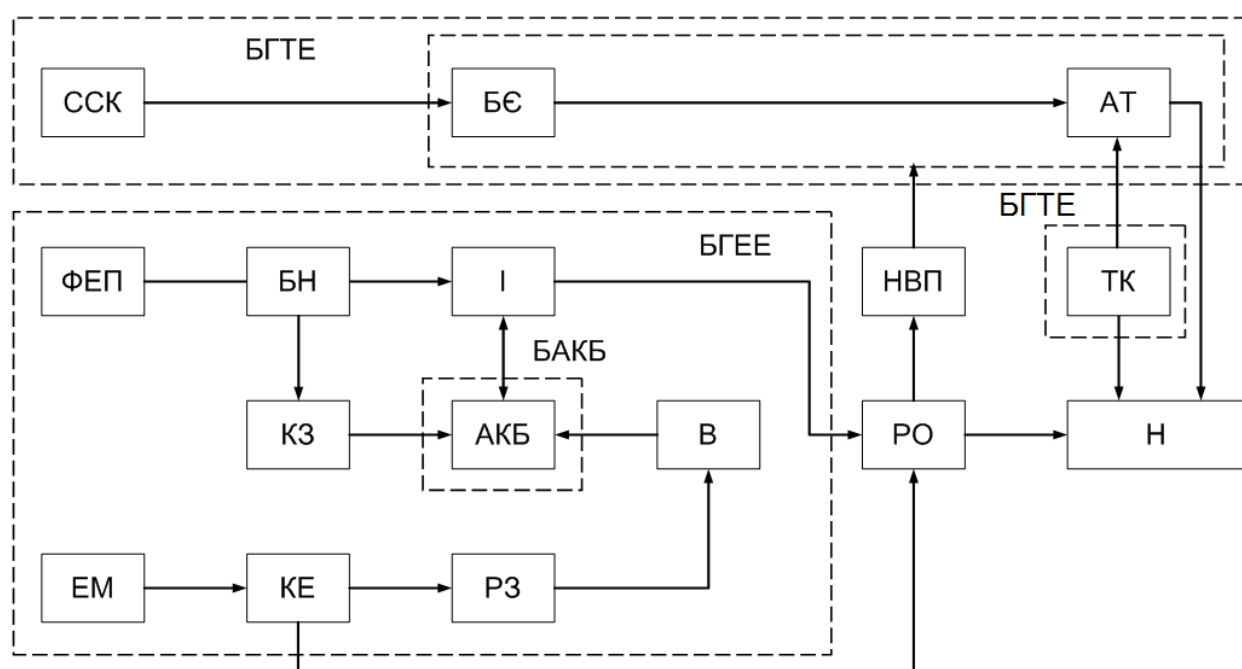


Рис. 11. Блок-схема функціонування системи комплексного енергозабезпечення споживачів із акумуляторами енергії: БГЕЕ – блок генерації електричної енергії; БАКБ – блок акумуляторних батарей; БГТЕ – блок генерації теплової енергії.

Система складається з трьох основних блоків: БГЕЕ – блок генерації електричної енергії, БАКБ – блок акумуляторних батарей та БГТЕ – блок генерації теплової енергії, до складу яких входять: фотоелектричні перетворювачі (ФЕП), які перетворюють енергію сонячної радіації в електричну для потреб навантаження (Н), електрична мережа (ЕМ), підключення до якої відбувається в періоди, коли енергії генерованої ФЕП недостатньо для потреб Н, за умови повного розряду блоку акумуляторних батарей (АКБ). Перетворення напруги ФЕП з постійної в змінну здійснюється за допомогою інвертора (І), зворотне – випрямляча (В). При підвищенні рівня сонячної активності, для того, щоб не відбувався перезаряд акумуляторів, у системі передбачений контролер заряду (КЗ) від фотоелектричних перетворювачів та регулятор заряду (РЗ) від мережі. Для відключення/підключення системи від/до електричної мережі в системі передбачений комутуючий елемент (КЕ). Передача енергії від генеруючих джерел до споживача здійснюється через розподільне обладнання (РО). Для акумуляції електричної енергії в системі запропоновано використання двох груп електрохімічних акумуляторних батарей. При цьому, кожна група АКБ, по чергово під'єднується до випрямляча напруги електричної мережі або до фотоелектричного перетворювача для їх заряджання та до інвертора напруги – для живлення споживачів таким чином, щоб одна група блоку АКБ завжди мала максимальний ступінь заряду ($\approx 100\%$) і була готовою для резервного живлення споживачів. В окремий блок виділено групу споживачів (циркуляційні насоси, джерела резервного підігріву теплоносія), які становлять навантаження власних потреб (НВП) запропонованої системи.

У складі даної системи також передбачено автоматично регульоване баластне навантаження (БН), призначене для утилізації можливої надлишкової потужності генерованої ФЕП. Як БН виступає, окрім блоку АКБ, система додаткового підігріву теплообмінної поверхні акумулятора теплоти (АТ) удосконаленої конструкції. Підключення останньої дає змогу як інтенсифікувати процес акумулявання, так і здійснити накопичення надлишку генерованої електричної енергії в ньому, перетворивши її при цьому в теплову. Але, за умови підвищеної хмарності, у перехідний та опалювальний періоди можлива відсутність надлишкової енергії, тоді робота системи переходить в режим її споживання, а не генерації. У цьому випадку покриття дефіциту теплової енергії здійснюється за рахунок включення до складу системи твердопаливного котла (ТК), а електричної – з мережі.

Розраховано кількість фотоелектричних перетворювачів (при базовій потужності одного модуля 100 Вт), необхідних для покриття навантаження споживачів від 500 до 10000 Вт залежно від періоду року. Середня тривалість роботи останніх протягом доби – 8–12 годин. Результати розрахунків представлено на рис. 12.

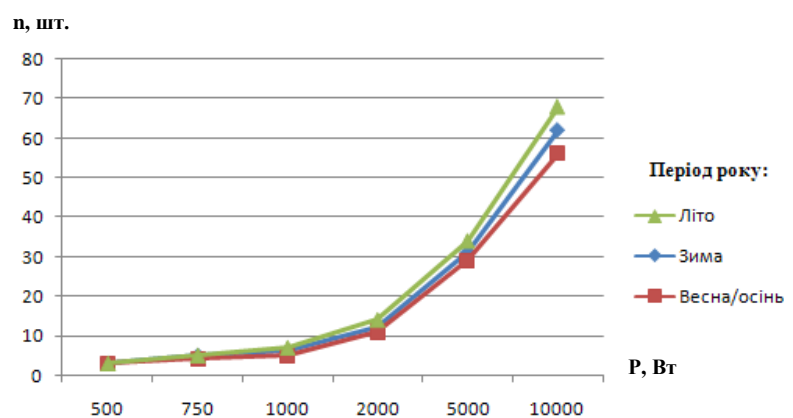


Рис. 12. Співвідношення кількості ФЕП залежно від потужності споживачів електричної енергії.

Визначено ймовірну тривалість безперервного живлення споживачів, наприклад, від двох 12-вольтових груп АКБ, за активної потужності споживачів від 500 до 2000 Вт і температури електроліту АКБ: $+20\dots-20$ °С. Номінальна ємність однієї АКБ, яка входить до складу кожної з груп, становить 100 А·год. У процесі розрахунку визначено величини: можливого часу безперервного живлення споживачів (рис. 13а), витрат ємності та коефіцієнта «розряду» АКБ (рис. 13б) залежно від потужності навантаження, при кількості m АКБ в групі від 2 до 4 шт. До того ж, визначено величину потужності «розряду» залежно від температури електроліту та ступеня «заряду» АКБ.

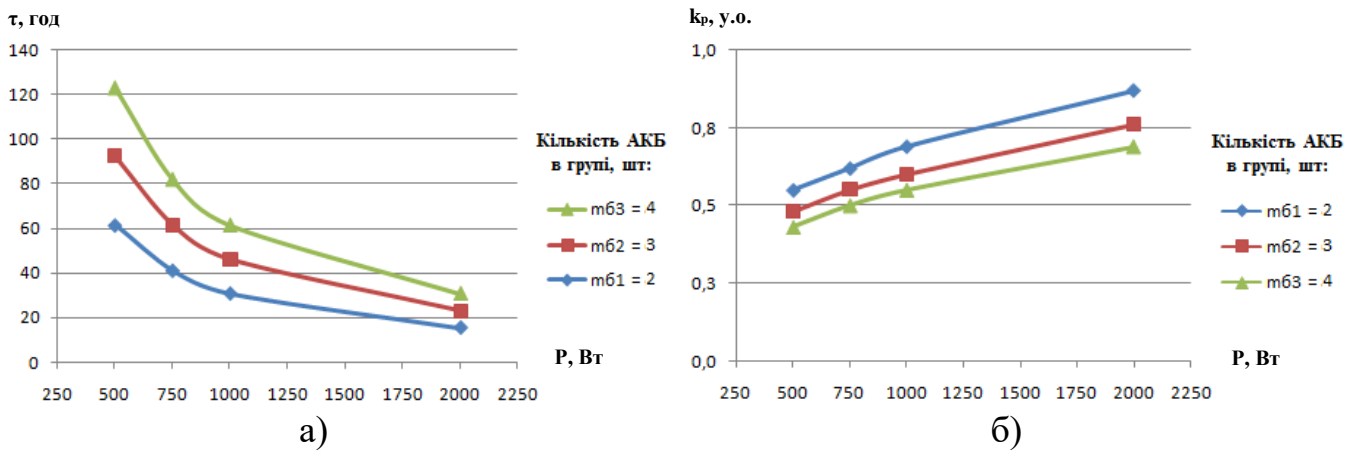


Рис. 13. Співвідношення тривалості розряду (а) та коефіцієнта «розряду» (б) групи АКБ залежно від потужності споживачів.

Встановлено, що для забезпечення ефективної роботи автономного живлення споживачів номінальною електричною потужністю 2000 Вт упродовж 24 годин та піковою (до 2-х годин) потужністю 5000 Вт, система має складатися з фотоелектричної панелі з активною площею геліополя $7,7\text{--}8,9$ м² та 12-вольтового акумулятора електричної енергії номінальною ємністю 315–365 А·год, а за теплової потужності навантаження 700 Вт – з сонячного колектора площею $4,5\text{--}5,8$ м² та одного акумулятора теплоти фазового переходу потужністю 8 кВт.

Проведений техніко-економічний аналіз свідчить, що річний економічний ефект на один комплект обладнання системи комплексного енергозабезпечення побутових споживачів електричною та тепловою енергією від альтернативних джерел номінальною потужністю 2000 Вт та піковою 5000 Вт, відповідно, становить 6896 грн на рік. Термін окупності системи, за умови продажу державі генерованої системою електричної енергії за «зеленим тарифом», не перевищує 5–7 років.

ВИСНОВКИ

Вирішено актуальну науково-технічну задачу, яка полягає в розробці системи комплексного енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел та комбінованого акумулятора енергії вдосконаленої конструкції, що дає змогу підвищити ефективність процесу енергоживлення споживачів тепловою й електричною енергією та скоротити енергетичні затрати на процес енергозабезпечення в цілому. Основні науково-технічні результати проведених досліджень полягають у наступному:

1. Проаналізовано основні варіанти побудови існуючих систем комбінованого енергозабезпечення споживачів, серед іншого, від альтернативних джерел енергії, виявлено низьку ефективність використання їх потужності та високу вартість одиниці отриманої енергії. У результаті запропоновано систему комплексного енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел та комбінованих акумуляторів енергії, яка є ефективною для використання в різних кліматичних зонах нашої країни.

2. Для запропонованої системи комплексного енергозабезпечення споживачів отримано вихідні дані щодо вибору ефективних параметрів її компонентного складу залежно від кліматичних умов розміщення та потужності побутового споживача. Встановлено, що для забезпечення ефективної роботи автономного живлення споживачів номінальною електричною потужністю 2000 Вт упродовж 24 годин та піковою (до 2-х годин) потужністю 5000 Вт, система має складатися з фотоелектричної панелі з активною площею геліополя 7,7–8,9 м² та 12-вольтового акумулятора електричної енергії номінальною ємністю 315–365 А·год, а за теплової потужності навантаження 700 Вт – з сонячного колектора площею 4,5–5,8 м² та одного акумулятора теплоти фазового переходу потужністю 8 кВт.

3. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність включення акумуляторів теплової та електричної енергії до складу запропонованої системи й визначено енергетичну ефективність від їх застосування. Встановлено, що при акумуляції енергії альтернативних джерел, або пільгової електричної енергії в нічний період доби, її вартість зменшується на 40–50 %, а теплової енергії – на 52–66 %.

4. Розроблено вдосконалену конструкцію акумулятора теплоти фазового переходу з хвилеподібним дном та додатковими багатоярусними електричними підігрівачами, що забезпечило зменшення його масогабаритних показників на 10–15 %, підвищення коефіцієнта корисного використання маси акумуляючого матеріалу – на 36 % та збільшення тривалості роботи акумулятора в режимі «розряд» – на 86 % за однакової теплової потужності зі зразком-аналогом.

5. На основі числових розрахунків процесів тепломасообміну в акумуляторі теплоти вдосконаленої конструкції встановлено параболічну залежність між граничним радіусом R радіального поширення теплоти в масиві акумуляючого матеріалу та геометричними параметрами теплообмінної поверхні – зовнішнім діаметром d_3 нагрівальної труби $1,45d_{mp.з.} \geq R \geq 1,25d_{mp.з.}$, що уможливило проведення «зарядки» і «розрядки» апарата з максимальною ефективністю.

6. Експериментально встановлено, що вдосконалена конструкція акумулятора теплоти має вищий показник ексергетичного коефіцієнта корисної дії, порівняно з відомими конструкціями на 12–15 %. Визначено, що нижній ряд нагрівальних елементів в акумуляючому матеріалі необхідно розміщувати на відстані, яка не перевищує величину граничного радіуса R , що уможливило мінімізацію застійних зон під час акумуляції теплової енергії та зменшення часу «заряджання» акумулятора на 15–20 %.

7. Адекватність числової моделі підтверджена зіставленням отриманих результатів з експериментальними даними. Встановлено, що різниця між температурними показниками не перевищує 5 %.

8. Отримано вихідні дані щодо вибору конструктивних параметрів комбінованого акумулятора енергії, на основі яких розроблено методику розрахунку та підготовлено практичні рекомендації з проектування нових конструкцій акумуляторів теплоти фазового переходу.

9. Проведений техніко-економічний аналіз свідчить, що річний економічний ефект на один комплект обладнання системи комплексного енергозабезпечення побутових споживачів електричною та тепловою енергією від альтернативних джерел номінальною потужністю 2000 Вт та піковою 5000 Вт, відповідно, становить 6896 грн на рік. Термін окупності, за умови продажу державі генерованої електричної енергії системою за «зеленим тарифом», не перевищує 5–7 років.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Козирський В. В. Результати спрощеного енергоаудиту об'єктів НУБіП України: [електронний ресурс] / [Козирський В. В., Берека О. М., Шеліманова О. В., **Антипов Є. О.**] // Енергетика і автоматика. – 2012. – № 1 (11). – С. 55–63. – Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/e-journals/eia/2012_1/12kvvonu.pdf. (Автор здійснив збір та опрацювання даних щодо величини втрат теплової енергії через огорожувальні конструкції опалюваних приміщень до термомодернізації).

2. Горобець В. Г. Разработка системы теплоснабжения индивидуального энергосберегающего дома с использованием альтернативных источников энергии и сезонного аккумулятора теплоты / В. Г. Горобець, **Е. А. Антипов** // Промышленная теплотехника. – 2012. – № 3 (6). – С. 22–23. (Автор обґрунтував компонентний склад системи енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел енергії та теплових акумуляторів, що забезпечує мінімізацію вартості кінцевої енергії).

3. Антипов Є. О. Енергозберігаюча система тепlopостачання на базі сезонного акумулятора теплоти: [електронний ресурс] / Є. О. Антипов // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2015. – Вип. 5. – Т. 1. – С. 177–184. – Режим доступу: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf5t1/25.pdf>.

4. Антипов Є. О. Комбінована система енергозабезпечення споживачів із застосуванням традиційних та альтернативних джерел і акумуляторів енергії: [електронний ресурс] / Є. О. Антипов // Енергетика і автоматика. – 2015. – № 1 (15). – С. 72–81. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/eia_2015_1_11.pdf.

Статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародної наукометричної бази даних:

5. Горобець В. Г. Розробка конструкції та моделювання теплообмінних процесів в сезонному акумуляторі теплоти / В. Г. Горобець, **Є. О. Антипов** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2012. – Вип. 174. – Ч. 2. – С. 221–229. (Автор здійснив комп'ютерне моделювання процесів тепломасообміну в

об'ємі акумулюючого матеріалу акумулятора теплоти, що дало змогу оптимізувати конструкцію акумуляційного апарата).

6. Горобець В. Г. Розрахунок та розробка конструкції теплового сольового акумулятора / В. Г. Горобець, **Є. О. Антипов** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2013. – Вип. 184. – Ч. 2. – С. 149–159. *(Автор розробив методiku розрахунку оптимальних геометричних параметрів акумулятора теплоти фазового переходу).*

7. Міщенко А. В. Аналіз теплового комфорту у приміщеннях навчального корпусу №8 НУБіП України після термомодернізації будівлі / А. В. Міщенко, О. В. Шеліманова, **Є. О. Антипов** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – Вип. 194. – Ч. 1. – С. 119–123. *(Автор здійснив збір та опрацювання даних щодо величини втрат теплової енергії через огорожувальні конструкції опалюваних приміщень після їх термомодернізації).*

8. Горобець В. Г. Застосування сонячних енергетичних установок та акумуляторів теплоти в системах теплозабезпечення теплиць / В. Г. Горобець, **Є. О. Антипов** // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. – Вип. 194. – Ч. 2. – С. 100–107. *(Автор проаналізував існуючі системи енергозабезпечення теплиць із застосуванням альтернативних джерел енергії та теплових акумуляторів і запропонував нову, більш ефективну, систему).*

9. Антипов Є. О. Експериментальне дослідження ефективності нової конструкції акумулятора теплоти фазового переходу / Є. О. Антипов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2015. – Вип. 209. – Ч. 2. – С. 253–257.

10. Антипов Е. А. Исследование процессов тепло- и массопереноса в низкотемпературных аккумуляторах теплоты при фазовых превращениях аккумулирующего материала / Е. А. Антипов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2015. – Вип. 15. – Т. 2. – С. 131–135.

11. Антипов Є. О. Чисельне дослідження процесів теплопереносу в низкотемпературних акумуляторах теплоти при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу / Є. О. Антипов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2015. – Вип. 224. – С. 208–213.

Статті у наукових виданнях інших держав:

12. Горобець В. Г. Компьютерное моделирование процессов тепломассопереноса в сезонном аккумуляторе теплоты / В. Г. Горобець, **Е. А. Антипов** // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. – 2014. – № 1 (14). – С. 15–20. *(Автор здійснив комп'ютерне моделювання процесів тепломасообміну при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу, що дало змогу мінімізувати масогабаритні показники акумуляційного апарата).*

13. Антипов Е. А. Экспериментальное исследование процессов фазового перехода в теплоаккумулирующих материалах органического происхождения / Е. А. Антипов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. – 2015. – № 3 (20). – С. 44–49.

Тези наукових доповідей:

14. Антипов Є. О. Розрахунок теплопостачання індивідуальних будинків з акумулюванням теплової енергії / Є. О. Антипов, В. Г. Горобець // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Міжнародна науково-технічна конференція, 14–26 жовтня 2013 р.: тези доповіді. – Київ. – С. 76–77. *(Автор проаналізував втрати теплової енергії в системі енергозабезпечення індивідуальних будинків, що дало змогу визначити шляхи її оптимізації).*

15. Горобець В. Г. Теплопостачання енергозберігаючого будинку на базі альтернативних джерел енергії та сезонного акумулятора теплоти / В. Г. Горобець, Є. О. Антипов // Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: II Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, 16–18 жовтня 2013 р.: тези доповіді. – Київ. – С. 170–171. *(Автор проаналізував існуючі системи енергозабезпечення енергозберігаючого будинку із застосуванням альтернативних джерел енергії та акумулятора теплоти фазового переходу та запропонував нову систему, що забезпечує мінімізацію вартості кінцевої енергії).*

16. Антипов Є. О. Розрахунок та розробка конструкції теплового сольового акумулятора / Є. О. Антипов, В. Г. Горобець // Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, 6–7 листопада 2013 р.: тези доповіді. – Київ. – С. 47. *(Автор розробив методіку розрахунку оптимальних робочих параметрів акумулятора теплоти фазового переходу).*

17. Горобець В. Г. Комп'ютерне моделювання процесів тепломасопереносу в сезонному акумуляторі теплоти / В. Г. Горобець, Є. О. Антипов // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Міжнародна науково-технічна конференція, 15–20 квітня 2014 р.: тези доповіді. – Київ. – С. 76–77. *(Автор здійснив комп'ютерне моделювання процесів тепломасообміну при фазових перетвореннях акумулюючого матеріалу).*

18. Aleksiejuk J. Computed modeling of heat and mass processes in seasonal heat accumulator / J. Aleksiejuk, A. Chochowski, Е. Antypov // Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: IV Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів: тези доповіді. – Київ: НУБіП України, 2014. – С. 139–140. *(Автор, числовим методом, дослідив ефективність нової конструкції акумулятора теплоти фазового переходу на основі парафіну).*

19. Горобець В. Г. Разработка новых конструкций, численное и экспериментальное исследование процессов тепло- и массопереноса в тепловых аккумуляторах с фазовым превращением материала / В. Г. Горобець, Е. А. Антипов // Теплотехника и энергетика в металлургии: XVII Международная конференция,

7–9 октября 2014 г.: тезисы доклада. – Днепропетровск: НМетАУ, 2014. – С. 66–66. (Автор розробив нову конструкцію акумулятора теплоти фазового переходу та числовими розрахунками й експериментальним шляхом дослідив ефективність його робочих характеристик).

20. Антипов Є. О. Теплоаккумуляційна система опалення приміщень / **Є. О. Антипов, В. Г. Горобець** // Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: II Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, 16–17 жовтня 2014 р.: тези доповіді. – Київ. – С. 40. (Автор розробив апаратне забезпечення нової системи теплоаккумуляційного обігріву приміщень на основі акумулятора теплоти фазового переходу, що дає змогу скоротити енергетичні затрати на процес енергозабезпечення в цілому).

21. Антипов Є. О. Аналіз існуючих та обґрунтування нової конструкції акумулятора теплоти фазового переходу / Є. О. Антипов // Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК: 69-а науково-практична конференція студентів, 22–23 квітня 2015 р.: тези доповіді. – Київ: НУБіПУ, 2015. – С. 109.

22. Антипов Е. А. Эффективность работы теплового аккумулятора на основе аккумулирующих материалов органического происхождения / Е. А. Антипов // Энергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України: VI Міжнародна науково-технічна конференція пам'яті І. І. Мартиненка, 10–14 червня 2015 р.: тези доповіді. – Мелітополь: ТДАУ, 2015. – С. 21–22.

АНОТАЦІЯ

Антипов Є. О. Система комплексного енергозабезпечення споживачів із застосуванням альтернативних джерел та комбінованих акумуляторів енергії. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню актуального завдання – створенню та дослідженню ефективності роботи системи комплексного енергозабезпечення споживачів електричною і тепловою енергією із застосуванням альтернативних джерел та акумуляторів енергії різних типів.

На основі аналізу патентно-ліцензійної документації щодо існуючих варіантів систем енергоживлення та конструкцій акумуляторів енергії, обґрунтовано необхідність та запропоновано систему комплексного енергозабезпечення споживачів із використанням акумуляторів електричної та теплової енергії вдосконаленої конструкції. Отримано вихідні дані системи, що створило можливість вибору ефективних параметрів її компонентного складу енергогенеруючого обладнання та акумуляторів теплової й електричної енергії залежно від кліматичних умов розміщення та потужності споживача.

Розроблено вдосконалену конструкцію комбінованого акумулятора енергії, яка відрізняється від зразка-аналога хвилеподібним дном та додатковим оснащенням

багатоярусними електричними підігрівачами. Отримано аналітичні залежності та розроблено методику інженерного розрахунку акумулятора теплоти фазового переходу. Визначено оптимальні робочі та геометричні параметри теплообмінної поверхні такого апарата, досліджено їх вплив на ефективність процесів акумуляції енергії під час роботи акумуляційного апарата в складі запропонованої системи.

Проведено ексергетичний аналіз акумулятора теплоти вдосконаленої конструкції порівняно зі зразком-аналогом, показано економічний ефект як від його використання, так і від впровадження запропонованої системи комплексного енергозабезпечення споживачів у цілому.

Ключові слова: система комплексного енергозабезпечення, акумулятор енергії, електричні нагрівачі, акумуляючий матеріал, фазовий перехід.

АННОТАЦІЯ

Антипов Е. А. Система комплексного энергообеспечения потребителей с применением альтернативных источников и комбинированных аккумуляторов энергии. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи – созданию и исследованию эффективности работы системы комплексного энергообеспечения потребителей электрической и тепловой энергией с применением альтернативных источников и аккумуляторов энергии разных типов.

На основе анализа патентно-лицензионной документации по существующим вариантам систем энергопитания и конструкций аккумуляторов энергии, обоснована необходимость и предложена система комплексного энергообеспечения потребителей, основанная на использовании энергии солнечного излучения и/или электрической сети с возможностью накопления ее избытка в аккумуляторах энергии. Такая система предназначена для покрытия электрической и тепловой нагрузки потребителей с повышением экономической эффективности систем отопления и/или горячего водоснабжения за счет использования энергии солнечной радиации и аккумулятора теплоты усовершенствованной конструкции. Получены исходные данные системы, что создало возможность выбора эффективных параметров ее компонентного состава энергогенерирующего оборудования и аккумуляторов тепловой и электрической энергии в зависимости от климатических условий размещения и мощности потребителя.

Предложенная система состоит из трех основных блоков: блока генерации электрической энергии, блока аккумуляторных батарей и блока генерации тепловой энергии. В состав первого блока входят фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) и электрическая сеть. Подключение потребителей к последней происходит в периоды, когда энергии, вырабатываемой ФЭП недостаточно для покрытия нагрузки объекта энергообеспечения, при условии полного разряда блока

аккумуляторных батарей (АКБ). В составе данной системы также предусмотрена автоматически регулируемая балластная нагрузка (БН), предназначенная для утилизации избыточной мощности генерируемой ФЭП. В качестве БН выступает, кроме блока АКБ, система электрического подогрева теплообменной поверхности аккумулятора теплоты усовершенствованной конструкции, что позволяет не только интенсифицировать процесс аккумуляции тепловой, но и осуществить накопление избытка генерируемой системой электроэнергии, превратив ее при этом в тепловую.

Для аккумуляции электрической энергии в системе предложено использование двух групп электрохимических аккумуляторов. При этом, каждая группа АКБ, поочередно подключается к выпрямителю напряжения электрической сети (или фотоэлектрического преобразователя) для их подзарядки и к инвертору напряжения – для питания потребителей таким образом, чтобы одна группа блока АКБ всегда имела максимальную степень заряда ($\approx 100\%$) и была готова для резервного питания потребителей.

Рассчитано количество фотоэлектрических преобразователей (при базовой мощности одного модуля 100 Вт), необходимых для покрытия нагрузки потребителей от 500 до 10000 Вт в зависимости от периода года.

На примере двух групп АКБ определено вероятную продолжительность непрерывного питания потребителей при активной мощности последних от 500 до 2000 Вт. В процессе расчета получены величины: возможного времени бесперебойного питания потребителей, расходов емкости и коэффициента «разряда» группы АКБ в зависимости от мощности нагрузки. Определено величину мощности «разряда» в зависимости от температуры электролита и степени «заряда» АКБ.

Установлено, что для обеспечения эффективной работы автономного питания потребителей номинальной электрической мощностью 2000 Вт в течении 24 часов и пиковой (до 2-х часов) мощностью 5000 Вт, система должна состоять из фотоэлектрической панели с активной площадью гелиополя 7,7–8,9 м² и 12-вольтового аккумулятора электрической энергии номинальной емкостью 315–365 А·час, а при тепловой мощности нагрузки 700 Вт – с солнечного коллектора площадью 4,5–5,8 м² и одного аккумулятора теплоты фазового перехода мощностью 8 кВт.

С целью достижения максимального уровня эффективности от внедрения предложенной системы, методом имитационного моделирования, было определено рациональное соотношение установленных мощностей для различных источников энергии, которые входят в состав такой комбинированной системы. Результаты моделирования показывают, что аккумуляторы энергии сглаживают суточные перепады поступления тепловой и электрической энергии, а также обеспечивают возможность снижения ее стоимости. Установлено, что при аккумуляции энергии альтернативных источников, или льготной электроэнергии в ночное время суток, ее стоимость уменьшается на 40–50 %, а тепловой энергии – на 52–66 %.

Разработана усовершенствованная конструкция комбинированного аккумулятора энергии, которая отличается от образца-аналога волнообразным дном и дополнительным оснащением многоярусными электрическими подогревателями. Получены аналитические зависимости и разработана методика инженерного расчета аккумулятора теплоты фазового перехода. Определены оптимальные рабочие и

геометрические параметры теплообменной поверхности такого аппарата, исследовано их влияние на эффективность аккумулирования энергии при работе аккумуляционного аппарата в составе предложенной системы.

Проведен эксергетический анализ аккумулятора теплоты усовершенствованной конструкции по сравнению с образцом-аналогом, показан экономический эффект как от его использования, так и от внедрения предложенной системы комплексного энергообеспечения потребителей в целом. Анализ свидетельствует, что годовой экономический эффект на один комплект оборудования системы комплексного энергообеспечения бытовых потребителей электрической и тепловой энергией от альтернативных источников номинальной мощностью 2000 Вт и пиковой 5000 Вт, соответственно, составляет 6896 грн в год. Срок окупаемости системы, при условии продажи государству генерируемой системой электрической энергии по «зеленому тарифу», не превышает 5–7 лет.

Ключевые слова: система комплексного энергообеспечения, аккумулятор энергии, электрические нагреватели, аккумулирующий материал, фазовый переход.

ABSTRACT

Antypov I. O. System of complex energy supply consumers with application alternative energy sources and combined storage of energy. – The manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

Dissertation is devoted to solving the actual problem – the creation and research of the effectiveness of integrated energy supply system consumer electric and thermal energy using alternative energy sources and different types of energy accumulators.

Based on the analysis of patent licensing documentation for the existing options of energy supply system and constructions of energy accumulators the necessity of system of integrated energy consumers is proposed using solar and electrical energy for accumulation. The initial data systems are obtained, creating a choice of effective options component of power generating equipment and heat and electric energy accumulators depending on the climatic conditions and capacity allocation consumer.

The advanced design of combined energy accumulator is different from standard analog wavy-bottom and extra equipment multistage electric heater. There are obtained the analytical relations and methods of engineering calculation of heat accumulator with phase transition. The optimum operating and geometrical parameters of heat transfer surface for this device are found, besides the influence of these parameters on efficiency of process of accumulation energy during operation of accumulator as part of proposed system.

An exergic analysis of heat accumulator improved design and compared to the prototype is made, it is shows the economic effect both on its use and implementation of the proposed system of complex energy consumers in general.

Key words: complex system of energy supply, energy accumulator, electric heaters, accumulating material, phase transition.

Підписано до друку 22.02.2016 р. Зам № 112.
Формат 60x90 1/16. Папір офсетний. Друк – цифровий.
Наклад 100 прим. Ум. друк. арк. 0,9
Друк «ЦП «КОМПРИНТ»
Свідоцтво ДК № 4131, від 04.08.2011 р.
м. Київ, вул. Предславинська, 28
Тел.: (044)-528-05-42, (067)-209-54-30