

О.В. Покляченко, ст. викладач
А.Г. Ткачук, к.т.н., доц.
А.А. Гуменюк, к.т.н., доц.
О.К. Хім'як, студент

Державний університет «Житомирська політехніка»

Емпіричний аналіз енергоефективності технології обігріву приміщення на базі електричного котла, що працює за зонним тарифом, та теплового акумулятора

У статті обґрунтовано доцільність застосування електричних котлів у парі з тепловими акумуляторами для оптимізації споживання електроенергії за зонним тарифом, а також необхідність врахування конструктивних та ізоляційних параметрів при проектуванні систем. Розглянуто концепцію використання блок-ТЕНів, змонтованих безпосередньо у патрубку теплового акумулятора, порівняно з традиційним електричним котлом, а також визначено ефективність системи генерації та накопичення теплової енергії під час дії нічного тарифу. Необхідність досліджень в цьому напрямі пояснюється сучасними викликами енергетичної безпеки, зростанням вартості енергоносіїв та необхідністю пошуку економічно доцільних рішень для забезпечення комфортних умов в опалюваних приміщеннях. У статті розглянуто техніко економічні показники, конструктивні особливості теплових акумуляторів, теплоізоляційні матеріали, алгоритми роботи та системи обв'язки. Експериментально досліджено стабільність роботи блок-ТЕНів у патрубку теплового акумулятора; виміряно ефективність роботи електричного котла 6 kW при високій температурі теплоносія; виконано оцінку втрат теплової енергії через ізоляцію акумулятора. Результати показали, що використання блок-ТЕНів у патрубку може призводити до тактування та зниження ефективності більш ніж на 50 %, тоді як сучасні електричні котли забезпечують стабільну роботу завдяки вбудованим насосам та системам регулювання.

Ключові слова: *електрокотел; ТЕН; тепловий акумулятор; втрати теплової енергії; коефіцієнт корисної дії; енергоефективність.*

Актуальність теми. Станом на 2026 рік ворог завдав значної шкоди енергетичній інфраструктурі України і кожен громадянин стикнувся з проблемою забезпечення якості комфортного життя. Енергетичні блекаути, планові та аварійні відключення електричної енергії, стали постійним компонентом повсякденного життя українців. В таких умовах завдання забезпечення комфортних умов проживання чи роботи у будівлях в зимовий період часу стає одним складним завданням.

Власники приватних будинків для обігріву житлових приміщень станом на сьогодні у переважній більшості використовують традиційні газові та електричні котли що працюють на системи опалення у вигляді радіаторів та/або теплих підлог. Причина використання таких генераторів теплоти очевидна – вони прості, відносно недорогі по вартості та невибагливі в обслуговуванні. При цьому вони безпечні, працюють автономно та забезпечують високий рівень комфорту для споживачів. Однак, як показали реалії життя, поряд з такими проблемами, як «блекаути» та неконтрольовані відключення електричної енергії, існує загальноприйнята тенденція відмови від закупівлі природного газу від держави агресора, та й загалом від використання природного газу для опалення будинків. Прогнозується, що зовсім скоро вартість енергоносіїв для побутових споживачів буде на рівні із тою ціною, яку платять європейські споживачі. Таким чином, комунальні платежі будуть займати значно більшу долю доходів громадян. Звичайно, все це змушує споживачів шукати альтернативні способи обігріву свого житла.

В якості генераторів теплової енергії, що використовують альтернативні види палива можливо використовувати генератори теплоти, що спалюють біомасу, або теплові насоси. І, звичайно, споживачі вирішуватимуть проблему інтеграції генератора теплоти на альтернативному паливі у існуючу систему теплової генерації. Однак вартість впровадження систем генерації теплової енергії на основі таких теплогенераторів досить висока, тому споживачі шукатимуть способи зниження вартості енергетичних ресурсів, спожитих традиційними теплогенераторами. І якщо на кількість спожитого котлом природного газу вплинути досить складно, то зменшити витрати на оплату електричної енергії для забезпечення роботи електричного котла у побутових споживачів є досить реальною. Підхід передбачає залучення двох пільгових компонентів: установка 2-зонного лічильника, що рахує енергію спожиту за період дії нічного тарифу значно дешевше ніж денну, та укладання договору на споживання електричної енергії з «тарифом на електричне опалення» для споживачів, у яких електричний котел є єдиним теплогенератором.

Головна проблема використання дешевої «нічної» електричної енергії побутовими споживачами полягає в необхідності її акумуляції. Для побудови системи накопичення саме електричної енергії в

сучасних акумуляторах доведеться витратити значні кошти, тому цікавим варіантом є перетворення «нічної» електроенергії у теплову із подальшим накопиченням її у тепловому акумуляторі. Однак для технічної реалізації цієї можливості потрібно додатково встановити в систему опалення тепловий акумулятор. Крім цього потужність електричного теплогенератора повинна бути значно вищою за пікові тепловтрати будинку, щоб за період дії «нічного» тарифу можна було і опалювати житло, і акумуляувати теплову енергію для компенсації тепловтрат приміщення у час доби, коли «нічний» тариф уже не діє.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. У [1] проаналізовано технологію Power-to-Heat (PtH), де електричні котли та теплові акумулятори використовуються для перетворення надлишкової електроенергії (зокрема в нічний час або від відновлювальних джерел енергії) у тепло. Автори показують, що електрокотли мають високий ККД (95–98 %), прості в експлуатації та дешевші в інвестиціях порівняно з тепловими насосами. Їх головна перевага проявляється саме при використанні надлишкової або дешевої нічної електроенергії. Також зазначено, що хоча електроенергія є дорогим ресурсом, використання котлів у нічний час або при надлишку генерації робить їх досить вигідними. Автори [1] підкреслюють, що подальші дослідження та розробки технології Power-to-Heat слід накопичувати та напрямом використання теплових сховищ, як додаткового елементу системи, що дозволить накопичувати тепло й використовувати його в пікові години. Це також веде до покращення загального балансу енергосистеми і зменшення споживання інших видів палива в установках теплогенерації [2]. Теплові сховища стандартно використовуються для зберігання енергії, отриманої від сонячних теплових електростанцій, що розкрито в [3, 4]. Використання акумуляції дає системі можливість забезпечувати енергією споживачів з постійною швидкістю, незважаючи на значні порушення графіку генерації. Додатковим стимулом впровадження таких технологій є також сприяння вирішенню проблем декарбонізації [4]. Проте матеріали [3, 4] стосуються досліджень значних генеруючих потужностей від 1 МВт та більше, а представлені результати є результатами лиш моделювання. Крім того, існують дослідження [5], в яких розробляються рекомендації щодо можливих конфігурацій пристроїв керування, що оптимізують процес «заряджання» та «розрядки» теплових накопичувачів. Але в [5] розглядаються теплові накопичувачі для теплоагенту зниженої температури та для значних теплових навантажень. Таким чином, актуальним є оцінювання ефективності теплових систем на базі електричних генераторів тепла з тепловими накопичувачами та для невеликих теплових навантажень рівня житлового приміщення. Аналогічно в [5–7] здійснюється пошук оптимального способу моделювання роботи теплового накопичувача, який би міг дати більш точні відповіді на питання вибору режимів функціонування теплових пристроїв акумуляції. Поряд з технічним обґрунтуванням актуальності накопичення тепла існують дослідження [8], де розглядається, як обґрунтована альтернатива, доцільність використання «нічного тарифу», тобто активація накопичення теплової енергії під час періодів мінімуму навантаження та мінімального тарифу в системі постачання та розподілу електричної енергії. Наводяться аргументи щодо використання оптимізаційних алгоритмів керування зарядом теплових акумуляційних пристроїв основі погодинних тарифних сіток в енергосистемі рівня окремої країни.

Слід зазначити, що розглянуті вище опубліковані результати все ж, у переважній більшості, не розкривають питань реальних фізичних випробувань. У всіх випадках важливим є накопичення статистики щодо параметрів систем електричного нагріву з тепловими акумуляторами в реальних умовах та з'ясування їх взаємозв'язку: техніко-економічні показники роботи [9], конструкція [10], теплоізоляційні матеріали [11], алгоритми роботи [12], периферія (системи обв'язки) [13] тощо. Кожен параметр формує окремий блок аналізу і водночас всі параметри взаємодіють в одній системі. У комплексі результати «польових» досліджень таких систем дозволяють створювати більш точні моделі систем на базі електричного нагрівача у парі з тепловим акумулятором, що надає можливість пошуку направленою на оптимізацію, мінімізацію витрат та забезпечення якості мікроклімату.

Метою статті є перевірка концепції використання блок-ГЕНів, вмонтованих безпосередньо у патрубку теплового акумулятора, порівняно із електричним котлом, що працює виключно для нагріву теплоносія у тепловому акумуляторі, та визначення ефективності роботи системи генерації теплової енергії, отриманої від електричного нагрівача за умов дії пільгового нічного тарифу на електроенергію для побутових споживачів, та з накопиченням згенерованої теплової енергії у тепловому акумуляторі.

Викладення основного матеріалу. На рисунку 1 зображена типова гідравлічна схема організації системи генерації теплової енергії для обігріву будинку, в якому частина приміщень опалюється радіаторами, а решта – «теплыми підлогами». Для забезпечення розподілу теплоносія відповідним споживачам з урахуванням їхніх потреб, на виході з теплового акумулятора встановлений розподільчий колектор із двома змішувальними насосними групами: одна група – з фіксованою температурою теплоносія, друга – із можливістю швидкої зміни температури теплоносія за рахунок 3-х ходового змішувального клапану та привід-контролера. Перша насосна група постачає теплоносій у систему радіаторного опалення, при цьому температура теплоносія залежить від положення заслінки 3-х ходового змішувального клапану, який керується привод-контролером з урахуванням температури повітря на вулиці та всередині приміщення. Друга насосна група працює на систему підлогового опалення, подаючи

теплоносій з фіксованою температурою, яка задана на термостатичному змішувальному клапані. Така система подачі теплоносія забезпечує високий рівень теплового комфорту та зниження перерегулювань температури повітря у будинку, які виникають при високих температурах теплоносія у системі опалення при використанні «прямих» насосних груп.

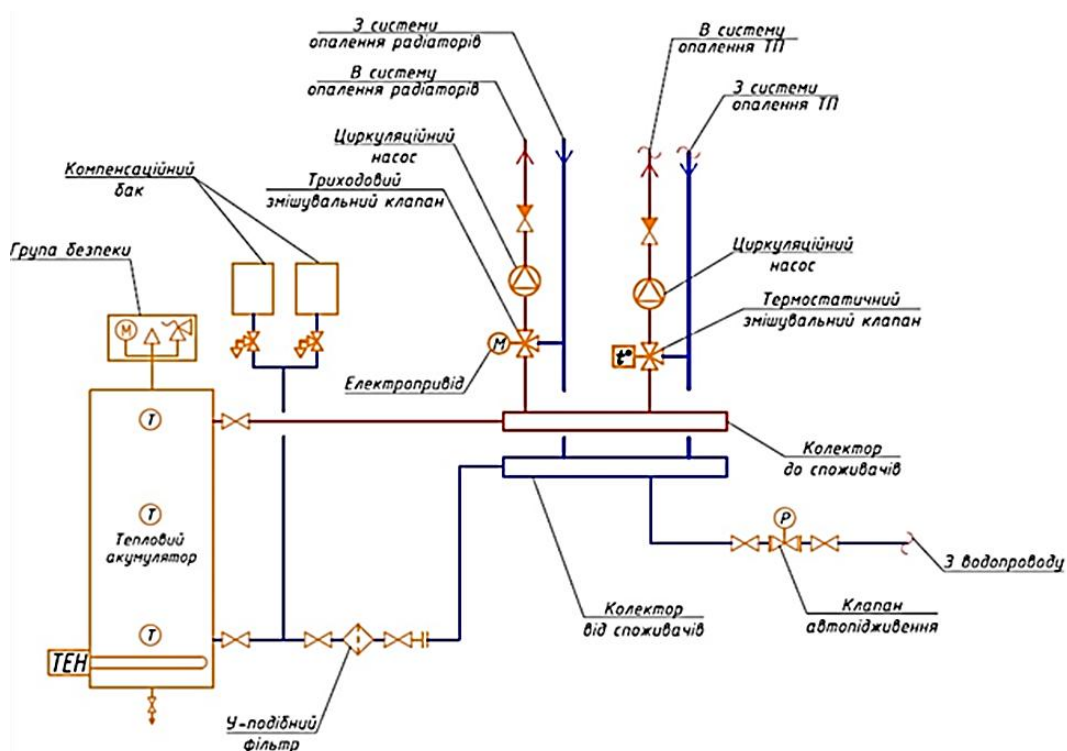


Рис. 1. Гідравлічна схема реалізації системи генерації теплової енергії з її накопиченням у теплому акумуляторі, де в якості теплогенератора присутній блок ТЕНів, вмонтованих безпосередньо у патрубку теплового акумулятора

Для успішної реалізації системи «нічного» накопичення теплової енергії треба вирішити 2 основні задачі: правильно розрахувати об'єм теплового акумулятора, щоб у ньому за час дії нічного тарифу було накопичено достатньо теплової енергії, та правильно розрахувати потужність електричного нагрівача, щоб він мав здатність вночі компенсувати тепловтрати будинку та при цьому акумулювати теплову енергію в теплому акумуляторі.

При реалізації системи генерації і накопичення теплової енергії за період дії нічного тарифу виникає два важливі питання:

1. Який пристрій генерації теплової енергії використати: електричний котел чи блок-ТЕНи?

2. Якою буде загальна ефективність системи накопичення теплової енергії з урахуванням втрат тепла у котлі та через ізоляцію теплового акумулятора?

Для відповіді на ці питання авторами було проведено аналіз сучасного рівня використання електричних теплогенераторів та теплових акумуляторів та комплексне емпіричне дослідження за трьома напрямками:

- дослідження стабільності роботи блок-ТЕНів, вмонтованих у патрубок теплового акумулятора.
- вимірювання реальної ефективності роботи електричного котла при високій температурі теплоносія у системі опалення.
- вимірювання втрат теплової енергії через ізоляцію теплового акумулятора.

1. Експериментальне дослідження стабільності роботи блок-ТЕНа для теплового акумулятора, що безпосередньо змонтований у патрубок смонтований. Експеримент проводився у приміщенні топкової житлового будинку. Для нагріву води у теплому акумуляторі був використаний блок-ТЕН від компанії Drazice потужністю 3,3 квт. версія «А», що вмонтований у патрубок теплового акумулятора від компанії «Теплобак», модель ВТА3-750. На регуляторі температури блок-ТЕНа була задана температура теплоносія на рівні +80°C. При включенні блок-ТЕНа у електричну мережу, спостерігалось тактування регулятора із періодичністю близько 7 хв, при цьому вода у теплому акумуляторі була значно нижчої температури, ніж задана на регуляторі блок-ТЕНа. Для контролю температури теплоносія у патрубку на його зовнішній поверхні було встановлено електронний термометр

Testo 115i, який фіксував зміну температури теплоносія в патрубку теплового акумулятора з періодичністю 2 секунди.

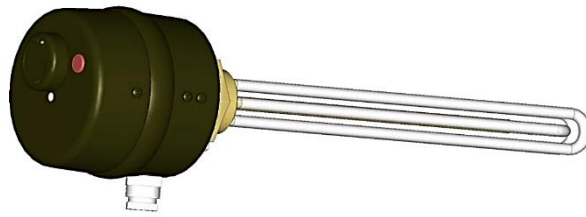


Рис. 2. Зовнішній вигляд досліджуваного різьбового блок-ТЕНа Drazice TJ 6/4 3,3 кВт тип «А» з вбудованим регулятором температури

Досліджуваний блок-ТЕН, зображений на рисунку 2, оснащений регулятором температури та запобіжним термостатом. Блок-ТЕН призначений для монтажу в корпус теплового акумулятора чи бака ГВП за допомогою різьбового з'єднання діаметром 1 ½. Що робить його досить універсальним пристроєм, який можливо вмонтувати в електричні водонагрівачі або теплові акумулятори.

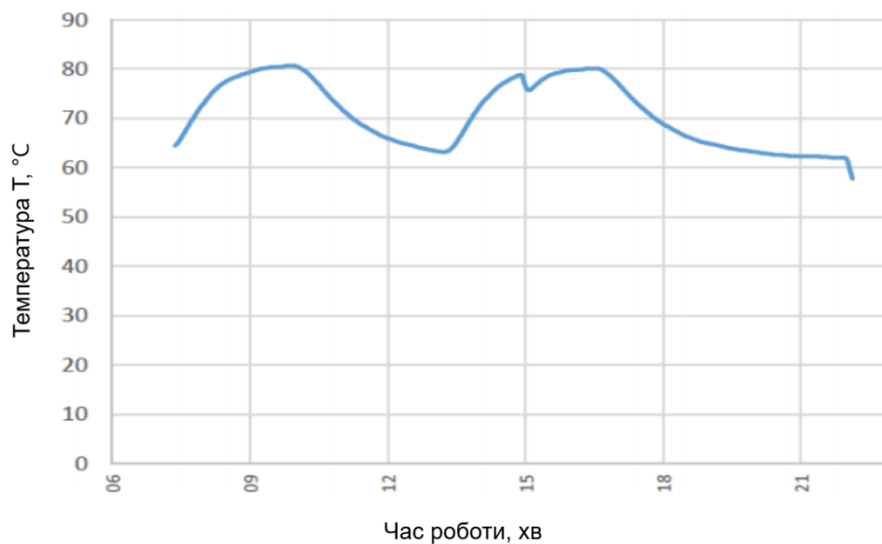


Рис. 3. Результати вимірювання температури в патрубку теплового акумулятора були сформовані у вигляді графіку за допомогою експорту даних із застосунку Testo Smart у вигляді CSV файлу із подальшою обробкою у програмі MS Excel

На графіку (рис. 3) зміни в часі температури теплоносія у патрубку теплового акумулятора, в якому був змонтований досліджуваний блок-ТЕН, чітко видно швидке зростання температури при включенні регулятора, та відносно швидке зниження температури при його виключенні. Тривалість робочого циклу нагрівання становила близько 3 хв, тривалість циклу охолодження становила 4 хв.

Експеримент показав, що в таких умовах досліджуваний блок ТЕНів працювати не здатний. Головна причина виявленого робочого тактування ховається у конструкції ТЕНів, які мають дуже незначну «холодну» зону. Тільки перші 2 см ТЕНа при подачі живлення не нагріваються, бо там розташовані струмоведучі компоненти. За рахунок монтажу блок-ТЕНів в умовах теплоізованого патрубка довжиною 10 см, природна конвекція теплоносія виражається слабо, і швидкість руху теплоносія з патрубка у ємність нижча за швидкість нагріву води ТЕНом. Як наслідок ТЕН перегрівається, а регулятор температури, відчуваючи перевищення температури теплоносія вище заданого значення, вимикає подачу живлення на ТЕНи. У зв'язку із низькою швидкістю циркуляції рідини навколо ТЕНів, експлуатація блок-ТЕНу в таких умовах буде мати негативні наслідки у більш інтенсивному відкладенні солей жорсткості на зовнішній поверхні трубки ТЕНа під час нагріву теплоносія.

Використання досліджуваних блок-ТЕНів, змонтованих безпосередньо у патрубку теплового акумулятора, може мати негативні наслідки для споживача у вигляді скорочення терміну експлуатації ТЕНів та значного (понад 50 %) зниження кількості теплової енергії, яку він здатний згенерувати за час своєї роботи, у період дії «нічного» тарифу на електричну енергію, за рахунок виявленого робочого «тактування».

Саме тому для нагріву теплоносія у тепловому акумуляторі доцільно використовувати: подовжену версію блок-ТЕНів (тип Б) зі збільшеною довжиною «холодної» зони ТЕНа, або сучасні електричні котли, у яких забезпечується достатня швидкість руху теплоносія навколо ТЕНа за рахунок вбудованого циркуляційного насосу.

2. Вимірювання реальної ефективності роботи електричного котла Protherm Scat 6kw при високій температурі теплоносія у системі опалення. Досліджуваний електричний котел Protherm Scat 6kw є популярним зразком сучасного обладнання, виготовленого у Європі, який за відгуками споживачів показав себе надійним та стабільним теплогенератором при роботі як у системах радіаторного опалення, так і у системах поверхневого опалення приміщень «теплою підлогою».

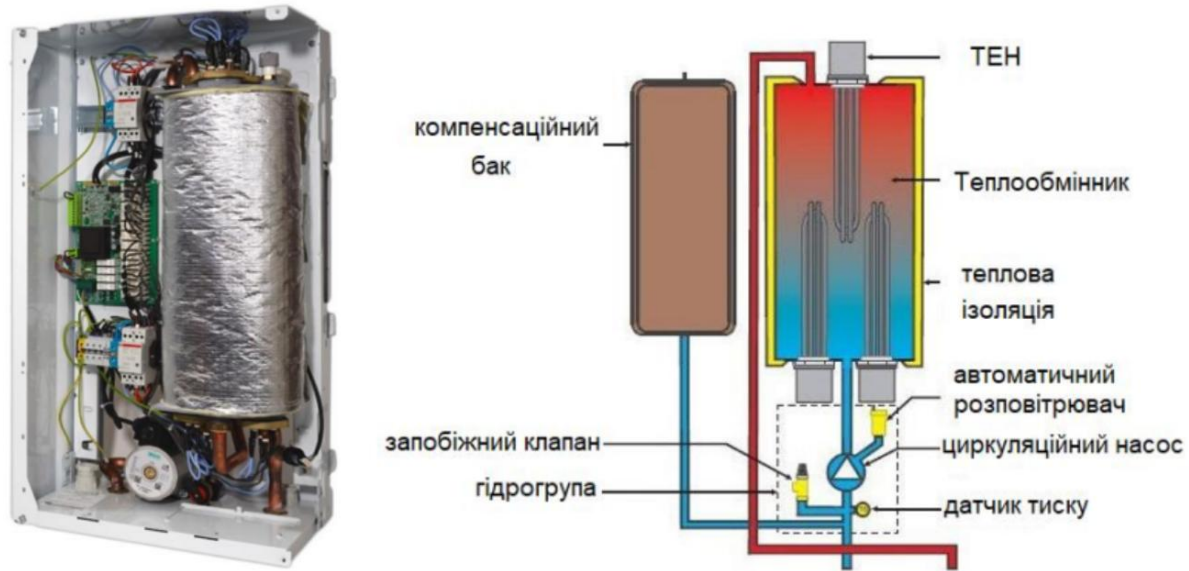


Рис. 4. Зовнішній вигляд без передньої панелі та гідравлічна схема досліджуваного електричного котла Protherm Scat 6kw

Функціональні можливості досліджуваного котла:

- модуляція теплової потужності із кроком 1 кВт;
- ротація ТЕНів під час роботи;
- регулювання температури опалення та гарячої води на панелі котла;
- дистанційне управління тепловою потужністю від 2-х зонного лічильника;
- можливість управління роботою котла від кімнатного термостату і (або) датчика зовнішньої температури (еквітермічне регулювання);
- м'який старт (протягом 100 с котел працює з мінімальною потужністю);
- відображення на дисплеї параметрів автодіагностики та кодів несправностей;
- вбудований двошвидкісний насос з автоматичним перемиканням швидкостей, закритий розширювальний 7-літровий бак, автоматичний повітреспускач та запобіжний клапан;
- захист від блокування насосу та 3-ходового вентиля (при приєднанні зовнішнього ємкісного водонагрівача);
- функція «вибігу» циркуляційного насоса;
- зручне підключення стабілізатора напруги для живлення плати керування;
- функція захисту від зниження тиску теплоносія в системі опалення;
- захист від «замерзання» котла і приєднаного водонагрівача.

Виробник досліджуваного електричного котла вказує в інструкції ККД на рівні 99 %. Однак при роботі котла у складі системи генерації теплової енергії із акумулятором теплоти, циркуляційний насос працюватиме постійно, поки присутній запит на нагрів теплоносія. При цьому на рисунку 4, де зображений досліджуваний електричний котел без передньої панелі, видно, що теплова ізоляція розташована тільки навколо резервуару із встановленими ТЕНами, а всі інші гідравлічні елементи котла не мають додаткової теплоізоляції, а це в свою чергу означає, що при нагріванні теплоносія в системі опалення, на неізольованих елементах котла неминуче будуть присутні теплові втрати.

Величина теплових втрат досліджуваного електричного котла, буде залежати від багатьох параметрів, основними з яких є: температура повітря у приміщенні, де встановлений котел, та температура теплоносія у котлі під час роботи.

Саме з метою вимірювання реальної ефективності роботи електричного котла, встановленого у приміщенні топкової житлового будинку, був проведений експеримент, що тривав 72 год.

Опис експерименту.

Досліджуваний електричний котел Protherm Scat 6kw був встановлений у технічному приміщенні, в якому контролювалася температура повітря (під час експерименту вона становила від +12,1 до +15,2 °С). Гідравлічно за допомогою трубопроводів котел був приєднаний до патрубків теплового акумулятора, трубопровід подачі до верхнього патрубка теплового акумулятора, а зворотній – до нижнього. Безпосередньо на виході теплоносія із котла був встановлений лічильник теплової енергії Gross WMZ-UA DN15, який обліковував кількість корисної теплової енергії, яку котел постачав у тепловий акумулятор. Для обліку кількості електричної енергії, споживаної електричним котлом, був використаний електронний лічильник електричної енергії НІК 2102. Для аналізу джерел втрат теплової енергії з компонентів досліджуваного котла був використаний тепловізор FLIR ONE.

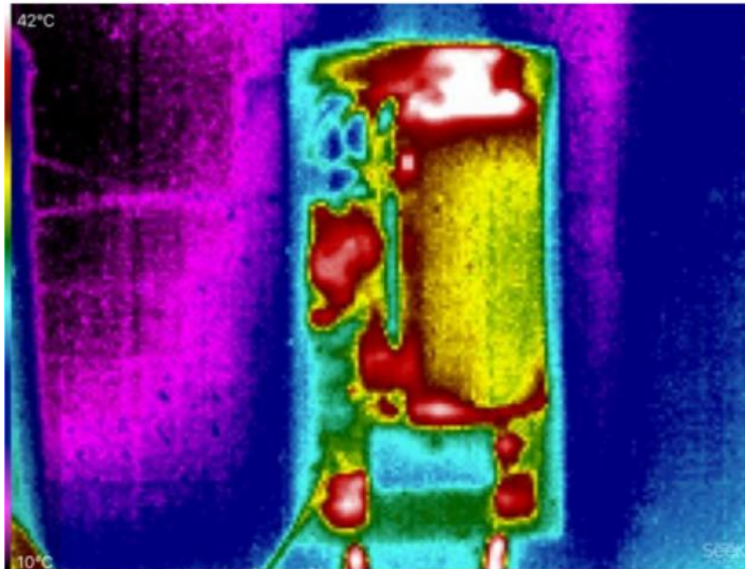


Рис. 5. Тепловізійне зображення досліджуваного електричного котла без передньої панелі

Дані, отримані в результаті експерименту:

$$Q_{\text{спож.}} = 230,4 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (1)$$

$$Q_{\text{тепл. ліч.}} = 185 \text{ Мкал} = 215,71 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (2)$$

$$\text{ККД}_{\text{котла}} = \frac{Q_{\text{тепл.ліч.}}}{Q_{\text{спож.}}} \cdot 100\% = 93,62 \%, \quad (3)$$

де $Q_{\text{спож.}}$ – кількість електричної енергії, яку за час експерименту спожив електричний котел;

$Q_{\text{тепл. ліч.}}$ – кількість теплової енергії, яку котел згенерував та віддав в тепловий акумулятор;

$\text{ККД}_{\text{котла}}$ – споживацький коефіцієнт корисної дії досліджуваного котла.

Причина такого невисокого показника ККД досліджуваного котла відносно даних, вказаних виробником, ховається у кількох аспектах: по-перше частина електричної енергії, яку споживає електричний котел, витрачається на роботу циркуляційного насосу та автоматику котла – за час експерименту витрати енергії на ці елементи котла склали 6,264 кВт · год; по-друге, як видно із тепловізійного зображення на рисунку 5, значна частина елементів котла мають неконтрольовані теплові втрати, які через корпус котла витрачаються на нагрів повітря у приміщенні, де встановлений котел, а не на нагрів теплоносія, що постачається у систему опалення.

3. Вимірювання теплових втрат водяного акумулятора теплової енергії ВТА3-750 із стандартною заводською теплоізоляцією, що працює у системі акумуляції енергії за нічним тарифом. Теплові акумулятори це гідравлічні прилади, які стали актуальними із розвитком застосування котлів, що спалюють біомасу. В теплогенеруючих системах їх використовують для згладжування нерівномірності теплового навантаження між генерацією тепловою енергією теплогенератором та споживанням теплоти системою опалення.

На цей час виробники пропонують широкий асортимент теплових акумуляторів як за розміром ємності (від 300 до 10 000 л), так із за комбінацією патрубків (від 6 до 24 шт.), і, звичайно, із різними варіантами внутрішнього наповнення та додатковими теплообмінниками (верхній змійовик, нижній змійовик, бак в баку, стратифікатори тощо). Також виробники комплектують свої теплові акумулятори різними видами

теплової ізоляції. Постачаючи обладнання замовнику, часто виробники не можуть вказати точні теплові втрати всього приладу в цілому, а тільки вказують теплоізоляційні властивості того матеріалу, з якого виготовлена теплоізоляція.

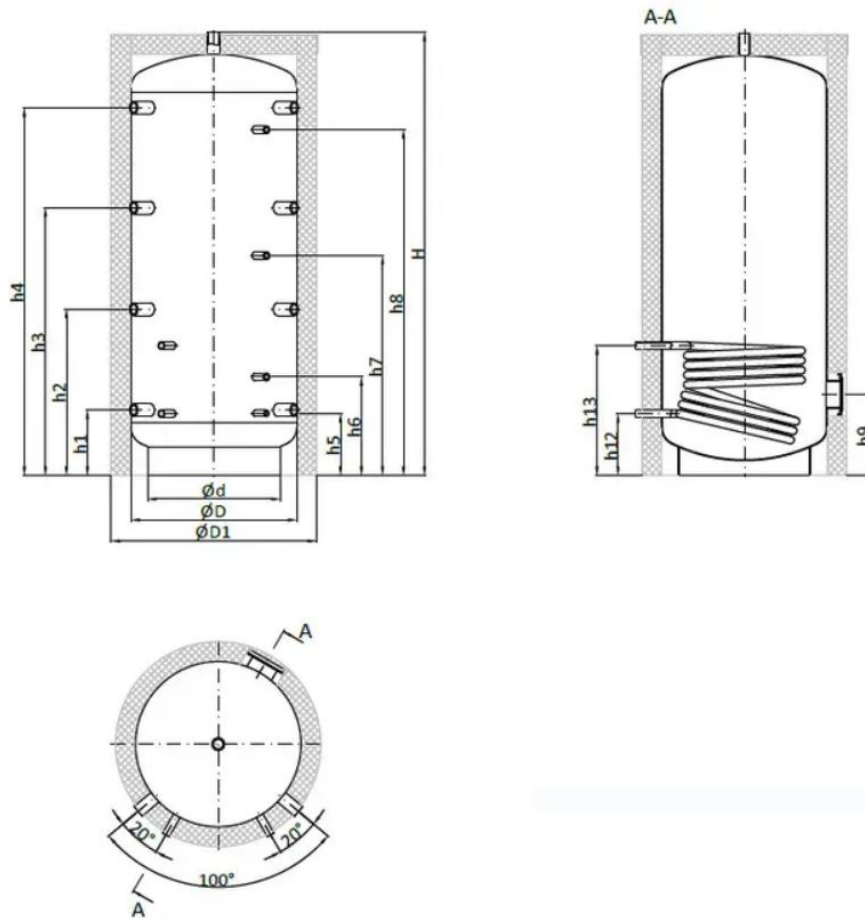


Рис. 6. Габаритні розміри та конфігурація патрубків досліджуваного теплового акумулятора BTA3-750

Проводячи розрахунки тепловтрат, ми можемо в більшості випадків врахувати багато параметрів, щоб дати відносно точне значення теоретичного показника теплових втрат. Однак при реальному застосуванні теплових акумуляторів у складі системи теплової генерації, часто виникає ситуація, при якій у гідравлічній системі задіяні не всі патрубки теплового акумулятора. Вільні патрубки зазвичай заглушують тільки гідравлічно, щоб не було витoku теплоносія із системи опалення, а тепловими втратами із незадіяних патрубків часто нехтують.

Оскільки досить складно провести розрахунок теплових втрат енергії через незадіяні патрубки теплового акумулятора, ми провели емпіричний експеримент, під час якого ми розташували тепловий акумулятор BTA3-750 (рис. 6) у технічному приміщенні житлового будинку. Приєднали тепловий акумулятор до теплогенератора (електричного котла потужністю 6 кВт), розігріли воду в теплому акумуляторі до значення $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, задали таку ж температуру теплоносія на котлі і залишили їх у робочому стані у приміщенні без відбору теплової енергії у систему опалення. В таких умовах тепла енергія, яка генерувалася котлом витрачалася виключно на компенсацію теплових втрат через поверхню теплового акумулятора.

Для контролю температури поверхні ізоляції теплового акумулятора був використаний контактний термометр Testo 905 T2. Тепловізійне зображення, встановленого у приміщенні теплоакумулятора, було зроблене за допомогою тепловізора FLIR ONE. Температура повітря у приміщенні та температура теплоносія у теплому акумуляторі вимірювалася за допомогою електронних термометрів з дистанційною передачею даних Testo Smart 115i. Кількість спожитої електричним котлом енергії вимірювалася електронним лічильником НІК 2102.

На тепловізійному зображенні досліджуваного теплового акумулятора на рисунку 7 чітко видно, що основним джерелом втрати теплової енергії є не поверхня теплоізоляції, а саме неізольовані металеві патрубки ємності.

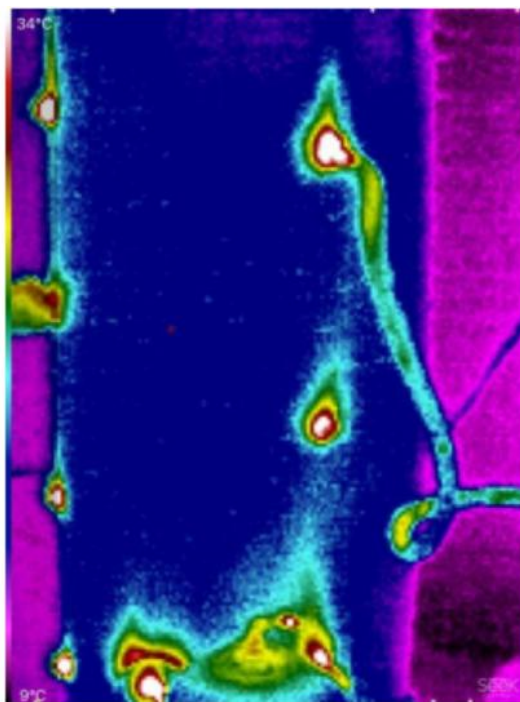


Рис. 7. Тепловізійне зображення досліджуваного теплового акумулятора ВТА3-750

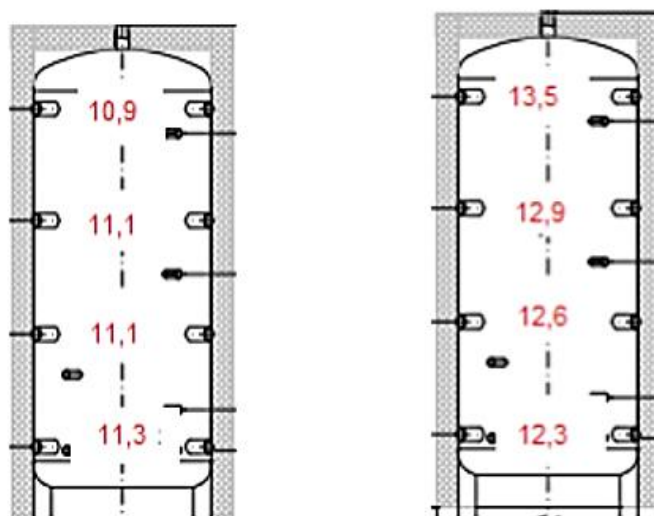


Рис. 8. Результати вимірювань температури поверхні ізоляції на початку (зліва) та наприкінці експерименту (справа)

Дані досліджень на початок експерименту:

$$Q_{\text{ел. поч.}} = 11,61 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (4)$$

$$T_{\text{пов.}} = 9,8 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (5)$$

$$T_{\text{води.}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (6)$$

де $Q_{\text{ел. поч.}}$ – початковий показник електричного лічильника;

$T_{\text{пов.}}$ – температура повітря у приміщенні;

$T_{\text{води.}}$ – температура теплоносія у теплому акумуляторі.

Дані досліджень через 24 год експерименту:

$$Q_{\text{ел. кінц.}} = 27,17 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (7)$$

$$T_{\text{пов.}} = 9,9 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (8)$$

$$T_{\text{води.}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (9)$$

Кількість спожитої електричним котлом енергії можливо визначити таким чином:

$$Q_{\text{спож.}} = Q_{\text{ел. поч.}} - Q_{\text{ел. кінц.}} = 15,56 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (10)$$

При розрахунку $Q_{\text{втр. т. а.}}$ – кількості теплової енергії, розсіяної через поверхню теплового акумулятора, оскільки покази теплового лічильника, встановленого на виході з електричного котла, мають дискретність в 1 МКал, і за час експерименту склали 12 МКал, це може накласти значну похибку на наш експеримент. Тому точніше буде врахувати кількість спожитої котлом електричної енергії та розрахований у експерименті № 2 ККД електричного котла:

$$Q_{\text{втр. т. а.}} = Q_{\text{спож.}} \cdot \text{ККД}_{\text{котла}} = 15,56 \cdot 0,9362 = 14,567 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (11)$$

Потужність теплових втрат через поверхню теплового акумулятора $P_{\text{втр. т. а.}}$ при температурному напорі в 60,15 °C склала:

$$P_{\text{втр. т. а.}} = \frac{Q_{\text{втр. т. а.}}}{t_{\text{експ.}}} = 14,567 \text{ кВт} \cdot \text{год} / 24 \text{ год} = 0,728 \text{ кВт.} \quad (12)$$

Вимірне значення теплових втрат енергії через поверхню теплового акумулятора є досить суттєвим, і повинно обов'язково бути враховане при проведенні розрахунків розмірів теплового акумулятора, для накопичення достатньої кількості теплової енергії, за час дії нічного тарифу.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В статті розкрито питання отримання емпіричних даних щодо ефективності роботи електричного котла в парі з тепловим накопичувачем з урахуванням зонного тарифу на електроенергію та тепловтрат.

Отримані емпіричні дані можуть бути використані при побудові більш точних математичних моделей, при виконанні проектування, модернізації, налаштування подібних систем, а також розширює інженерні знання щодо можливостей ефективно накопичувати та зберігати енергію. Поєднання якісного вимірювального інструментарію, включно з вимірюваннями, здійсненими за допомогою тепловізора, дозволили виконати аналіз щодо глибшого розуміння втрат енергії в системі, розробити рекомендації щодо проектування подібних систем з вищими показниками енергоефективності.

Для нагріву теплоносія у тепловому акумуляторі за час дії нічного тарифу на електричну енергію доцільніше використовувати електричний котел із вбудованим циркуляційним насосом ніж блок-ТЕНів версія «А». Це гарантуватиме стабільну генерацію необхідної кількості теплової енергії, а також зменшить інтенсивність утворення солей жорсткості на поверхні ТЕНів.

При проведенні розрахунків теплової потужності електричного котла, що буде заряджати тепловий акумулятор за час дії нічного тарифу, необхідно враховувати реальний ККД теплогенератора, який буде залежати від багатьох факторів. Досліджуваний електричний котел в умовах експерименту продемонстрував ККД на рівні 93,62 %.

Теплові акумулятори дійсно мають здатність накопичувати теплову енергію, кількість якої залежить від розмірів теплового акумулятора, температури нагрітого в ньому теплоносія, фізичних властивостей теплоносія та температури повітря у приміщенні, в якому встановлений тепловий акумулятор. Проведений експеримент показав, що за годину повністю прогрітий до +70 °C тепловий акумулятор об'ємом 750 літрів може втрачати 0,728 кВт·год теплової енергії. Такі втрати теплової варто враховувати при розрахунку розмірів теплового акумулятора для накопичення теплової енергії за час дії нічного тарифу на електричну енергію.

Експеримент № 3 показав значну величину тепловтрат неізольованих патрубків теплового акумулятора, якщо їх додатково утеплити, можна скоротити величину неконтрольованих тепловтрат, тому доцільно було б дослідити величину зниження тепловтрат після додаткового утеплення всіх патрубків теплового акумулятора.

Експеримент № 1 із блок-ТЕНом версія «А» виявив його нестабільну роботу у зв'язку із низькою швидкістю циркуляції рідини всередині патрубка теплового акумулятора. У виробників також є подовжена версія блок-ТЕНів, у яких ширша холодна зона ТЕНа. Було б доцільно дослідити стабільність роботи такої подовженої версії блок-ТЕНа.

Враховуючи постійне зростання вартості електричної енергії для побутових споживачів, було б доцільно дослідити ефективність застосування теплового насосу типу повітря-вода для заряджання теплового акумулятора у період дії нічного тарифу на електричну енергію.

References:

1. Derii, V.O., Nechaieva, T.P. and Zgurovets, O.V. (2024), «Technological possibilities of increasing the resilience of the power and district heating systems of Ukraine», *Energy Technologies & Resource Saving*, Vol. 4, doi: 10.33070/etars.4.2024.01.
2. Hu, B., Wang, S., Zhang, X. et al. (2019), «Power grid peak shaving strategies based on electric vehicles and thermal storage electric boilers», *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, doi: 10.1088/1755-1315/227/3/032026.
3. Powell, K.M. and Edgar, T.F. (2012), «Modeling and control of a solar thermal power plant with thermal energy storage», *Chemical Engineering Science*, Vol. 71, doi: 10.1016/j.ces.2011.12.009.

4. Rodriguez, E. (2026), «Electrified Heat Systems and Smart Grid Integration for Decarbonizing Refinery Utilities»
5. Cole, W.J., Edgar, T.F. and Novoselac, A. (2012), «Use of model predictive control to enhance the flexibility of thermal energy storage cooling systems», *Proceedings of the American Control Conference (ACC)*, doi: 10.1109/ACC.2012.6314689.
6. Powell, K. M. and Edgar, T.F. (2013), «An adaptive-grid model for dynamic simulation of thermocline thermal energy storage systems», *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.043.
7. Heinekamp, V.M., Krutzsch, J., Sick, S. et al. (2021), «Generalized Additive Modeling of Building Inertia Thermal Energy Storage for Integration Into Smart Grid Control», *IEEE Access*, Vol. 9, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078802.
8. Cole, W.J., Powell, K.M. and Edgar, T.F. (2012), «Optimization and advanced control of thermal energy storage systems», *July Reviews in Chemical Engineering*, Vol. 28, doi: 10.1515/revce-2011-0018.
9. Zhang, Y., Johansson, P. and Sasic Kalagasidis, A. (2021), «Techno-economic assessment of thermal energy storage technologies for demand-side management in low-temperature individual heating systems», *Energy*, Vol. 236, doi: 10.1016/j.energy.2021.121496.
10. Kwasi-Effaha, C.C. and Okpako, O. (2025), «Comprehensive review of emerging trends in thermal energy storage mechanisms, materials and applications», *Front. Energy Res.* Vol. 13, doi: 10.3389/ferg.2025.1651471.
11. Long, L. and Ye, H. (2016), «The roles of thermal insulation and heat storage in the energy performance of the wall materials: a simulation study», *Sci Rep*, Vol. 6, doi: 10.1038/srep24181.
12. Zhang, X., Feng, J., Liang, G. et al. (2024), «Bi-Level Optimal Configuration of Electric Thermal Storage Boilers in Thermal-Electrical Integrated Energy System», *Electronics*, Vol. 13, doi: 10.3390/electronics13173567.
13. Sinha, R., Bak-Jensen, B., Pillai, J.R. and Zareipo, H. (2020), «Flexibility from Electric Boiler and Thermal Storage for Multi Energy System Interaction», *Energies*, Vol. 13(1), doi: 10.3390/en13010098.

Покляченко Олександр Віталійович – старший викладач Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- Автоматизація; приладобудування; HVAC-системи; альтернативна енергетика.

Ткачук Андрій Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0003-2466-6299>.

Наукові інтереси:

- автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи;
- мобільні роботизовані платформи;
- системи стабілізації озброєння.

Гуменик Анна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-5744-4599>.

Наукові інтереси:

- автоматизація; приладобудування; інформаційно-вимірювальні системи.

Хім'як Олександр Костянтинівич – студент Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- електротехніка; електромеханіка; релейна автоматика; електроенергетичні системи.

Pokliachenko O.V., Tkachuk A.G., Humeniuk A.A., Khimiak O.K.

Empirical analysis of energy efficiency of heating technology based on electric boilers with time-of-use tariffs and thermal energy storage

This article substantiates the feasibility of employing electric boilers in conjunction with thermal storage units to optimize electricity consumption under zonal tariffs. It emphasizes the necessity of accounting for structural and insulation parameters during system design. The concept of integrating electric heating element (EHE) blocks directly into the thermal storage unit's pipes is examined in comparison with conventional electric boilers, with an evaluation of the efficiency of heat generation and storage systems during nighttime tariffs. The relevance of research in this field is driven by contemporary challenges in energy security, rising energy costs, and the pursuit of economically viable solutions to ensure comfortable indoor conditions.

The study addresses techno-economic indicators, structural features of thermal storage units, insulation materials, operational algorithms, and piping systems. Experimental investigations assessed the stability of EHE blocks installed in the storage unit's pipe, measured the performance of a 6 kW electric boiler at elevated coolant temperatures, and evaluated thermal energy losses through the storage unit's insulation. Results indicate that the use of EHE blocks in the pipe can lead to cycling and efficiency reductions exceeding 50 %, whereas modern electric boilers maintain stable operation due to integrated pumps and control systems.

Keywords: electric boiler; electric heating element; thermal storage unit; heat loss; efficiency factor; energy efficiency.

Стаття надійшла до редакції 22.12.2025.