

УДК 62-683

Метод определения теплотерь вертикальных цилиндрических емкостей на основании суммарного термического сопротивления теплоотдаче

С. А. Задорожный, С. Г. Потапов, А. В. Форсюк

Национальный университет пищевых технологий, ул. Владимирская, 68, Киев, 01601, Украина

e-mail: seregadom@ukr.net

Рассмотрен вопрос энергетической эффективности одного из элементов системы теплового насоса – бака-аккумулятора тепловой энергии. Характеристика эффективности данного аппарата – это минимальная величина потерь тепла и для ее определения разработана модель экспериментальной установки, которая дала возможность вывести эмпирическую зависимость. Проведен ряд исследований при различных температурных условиях окружающей среды и с разными вариантами конструкции установки. За полученными данными определены действительные значения суммарных термических сопротивлений теплоотдаче и выведено уравнение за которым их можно определить с минимальной погрешностью в зависимости от изменения температуры теплоносителя, термического сопротивления ограждающей конструкции емкости и температуры окружающей среды. На основании данных полученных с экспериментальной установки выполнено сравнение результатов теоретических расчетов существующих методик, результатов за предложенной зависимостью и действительных данных. Выполнена верификация полученной зависимости на емкостях различных габаритов и вместимости при одинаковых условиях работы.

Ключевые слова: Тепловой насос, бак-аккумулятор, бойлер, термическое сопротивление теплопередаче

Метод визначення тепловтрат у вертикальних циліндричних ємностях на основі сумарного термічного опору тепловіддачі

С. А. Задорожний, С. Г. Потапов, А. В. Форсюк

Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, 01601, Україна

e-mail: seregadom@ukr.net

Розглянуто питання енергетичної ефективності одного з елементів системи теплового насосу – бака-аккумулятора теплової енергії. Характеристикою ефективності даного апарата являється мінімальна величина втрат тепла і для її визначення розроблена модель дослідної установки, яка дала можливість встановити емпіричну залежність. Проведений ряд досліджень для різних температурних умов навколишнього середовища та з різними варіантами конструкції установки. За отриманими даними визначено дійсні значення сумарних термічних опорів тепловіддачі та встановлено рівняння за яким їх можна визначити з мінімальною похибкою, залежно від зміни температури теплоносія, термічного опору огорожуючої конструкції ємності та температури навколишнього середовища. На основі даних отриманих з дослідної установки проведено порівняння результатів теоретичних розрахунків існуючих методик, результатів за запропонованою залежністю та дійсних даних. Проведена верифікація отриманої залежності на ємностях різних габаритів та місткості при однакових умовах роботи.

Ключові слова: Тепловий насос, бак-аккумулятор, бойлер, термічний опір теплопередачі.

© The Author(s) 2017. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1 Вступ

Заощадження енергоресурсів, збереження навколишнього середовища, підвищення ефективності обладнання, зменшення капітальних затрат – це питання, які постійно постають перед користувачами енергетичного обладнання. З названих пунктів виділити найважливіший і вдосконалити лише його

неможливо по причині їхньої рівнозначності. Тому в практичній діяльності якимись питаннями доводиться нехтувати або шукати оптимальне рішення, враховуючи частину з них.

Ці питання актуальні як для промислових підприємств так і для рядового споживача. Коли мова йде про промислове обладнання, його недосконалість набагато помітніша ніж недосконалість побутових

приладів. При цьому промислове і побутове обладнання має різну продуктивність, проте за кількістю і сумарною потужністю побутове переважає.

Одним з прикладів такого обладнання, присутнього як у промисловості так і в побуті, є накопичувальний бойлер системи гарячого водопостачання (ГВП) та бак-акумулятор системи тепlopостачання.

Дані апарати являються обов'язковою умовою повноцінної роботи систем тепlopостачання на базі теплових насосів типу ґрунт-вода, вода-вода, повітря-вода, які можуть використовуватись для створення комфортних умов в житлових будинках, офісних приміщеннях, навчально-освітніх закладах та ін.

До систем на основі теплових насосів висувається ряд вимог: автономність, максимальна автоматизація всіх процесів, якість, максимальна енергоефективність. При чому ефективність всієї системи залежить від ефективності кожного елемента, які входять до її складу. Бойлер і бак-накопичувач не являються виключенням і мають значний вплив на рівень енергетичної ефективності установки.

Питання ефективності роботи баку можна сформулювати так: щоб зменшити втрати теплоти через стінки, необхідно забезпечити оптимальну товщину теплоізоляції.

На практиці виникають додаткові запитання, які потребують відповіді:

- яка дійсна товщина теплоізоляційного шару;
- яка дійсна теплопровідність теплоізоляції;
- доцільність цілодобового підтримання заданої температури в баках системи ГВП;
- якими будуть втрати теплоти в періоди простоювання.

В зв'язку з цим постає питання – як швидко, просто та з максимальною достовірністю визначити величину втрат теплоти накопичувальних ємностей. Процеси теплообміну на перший погляд прості – теплопровідність через циліндричну стінку, тепловіддача у великому об'ємі без примусового руху рідини і повітря, однак все ускладнюється нестационарними процесами теплообміну.

2 Мета і задачі

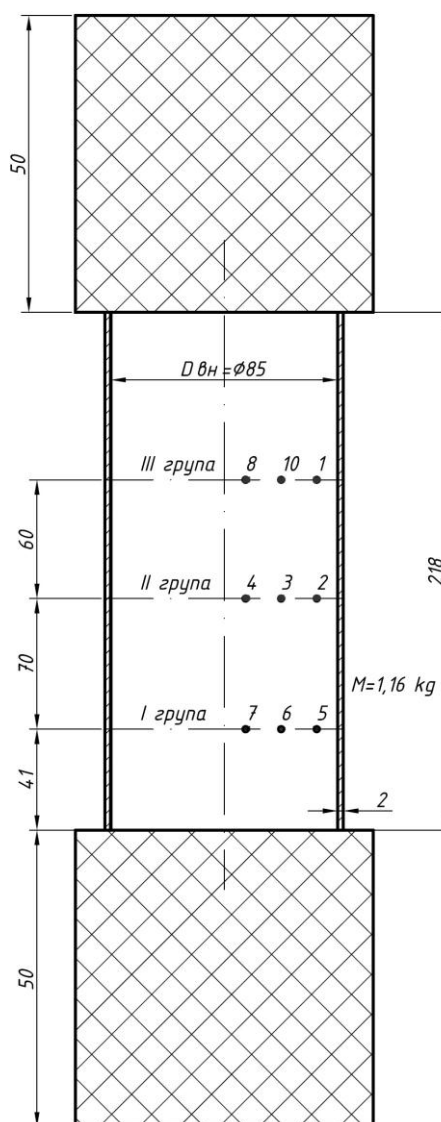
Мета роботи – розробити метод точного і простого розрахунку втрат теплоти для вертикальних циліндричних ємностей, що слугують накопичувачами бойлера чи баками-акумуляторами систем опалення в побутових системах.

Задачами дослідження стали: розроблення та збирання дослідної установки, верифікація отриманих практичних даних та результатів теоретичного розрахунку, проведення експериментальних досліджень для різних температурних режимів і різних конструкцій ємностей. Очікуваний результат дослідження – отримання залежності для визначення термічного опору тепловіддачі, розроблення простого методу розрахунку втрат теплоти і проведення апробації отриманих результатів для існуючих побутових приладів.

3 Дослідна установка

Вихідні параметри для отримання кінцевого результату: температура води та її кількість, габаритні розміри та конструкція огороження ємності, температура навколишнього середовища, яка приймається постійною на весь час експерименту.

Для спрощення задачі розрахунку коефіцієнта теплопередачі було запропоновано встановити тепловіддачу виведену емпіричним способом. Для цього розроблено та зібрано дослідну установку (рисунок 1): вертикальна циліндрична ємність з міді, що має ізолювані кришки, з розміщеними всередині датчиками температури 9 шт. (по 3 шт. за висотою). Система збору даних автоматизована – сигнали з датчиків температури (термісторів Pt1000A), оброблюються АЦП Triton, після чого передаються на ПК і записуються програмою з дискретністю в 1 с.



1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 – датчики температури

Рисунок 1 – Дослідна установка

В дослідній установці передбачалася можливість змінювати товщину теплоізоляції. Для проведення експерименту облаштовували теплоізоляцію трьох різних товщин, термічний опір яких, R_{λ} , (м²К)/Вт, становив відповідно: $5,12 \cdot 10^{-6}$, 0,173 та 0,299.

4 Встановлення граничних умов та розрахункової залежності

Через складність вимірювання температури поверхні стінки ємності (мала товщина стінок порівняно з габаритними розмірами використаних здавачів температури), було прийняте рішення визначити сумарний термічний опір тепловіддачі і для нього встановити залежність, яка б враховувала габаритні розміри ємності, термічний опір теплопровідності конструкції огороження і температуру навколишнього середовища в процесі теплообміну.

Прийняті граничні умови для виведення залежності такі: температура води в ємності змінюється від 80 до 40 °С; температура навколишнього середовища від 10 до 30 °С; термічний опір теплопровідності огорожень від 0 до 0,8 (м²К)/Вт. Дослідження проводились у встановлених граничних межах.

Отримана залежність для визначення сумарного термічного опору тепловіддачі має вигляд:

$$\sum R_{\alpha} = a \Delta t_w^c + b,$$

де Δt_w – різниця температур між водою та навколишнім середовищем, °С; a – коефіцієнт який

враховує вплив температури навколишнього середовища на величину сумарного термічного опору тепловіддачі; b – коефіцієнт, який враховує вплив термічного опору теплопровідності на величину сумарного термічного опору тепловіддачі; c – коефіцієнт, який задає характер термічного опору тепловіддачі, постійна величина (для умов проведення експерименту прийнято $c = 1,35$).

Коефіцієнт a визначається залежно від значення температури навколишнього середовища:

$$a = -0,89 \cdot 10^{-5} \cdot t_{air}^4 + 3,9,$$

де t_{air} – температура навколишнього повітря, °С

Коефіцієнт b визначається залежно від значення термічного опору теплопровідності:

$$b = -0,0561 \cdot R_{\lambda}^2 + 0,0502 \cdot R_{\lambda} + 0,105,$$

де R_{λ} – коефіцієнт термічного опору теплопровідності огорожувальної конструкції, (м²К)/Вт.

5 Аналіз отриманих результатів

Порівняння експериментальних та розрахованих за запропонованою та відомими критеріальними залежностями для температури навколишнього середовища 20°С наведено на рисунку 2.

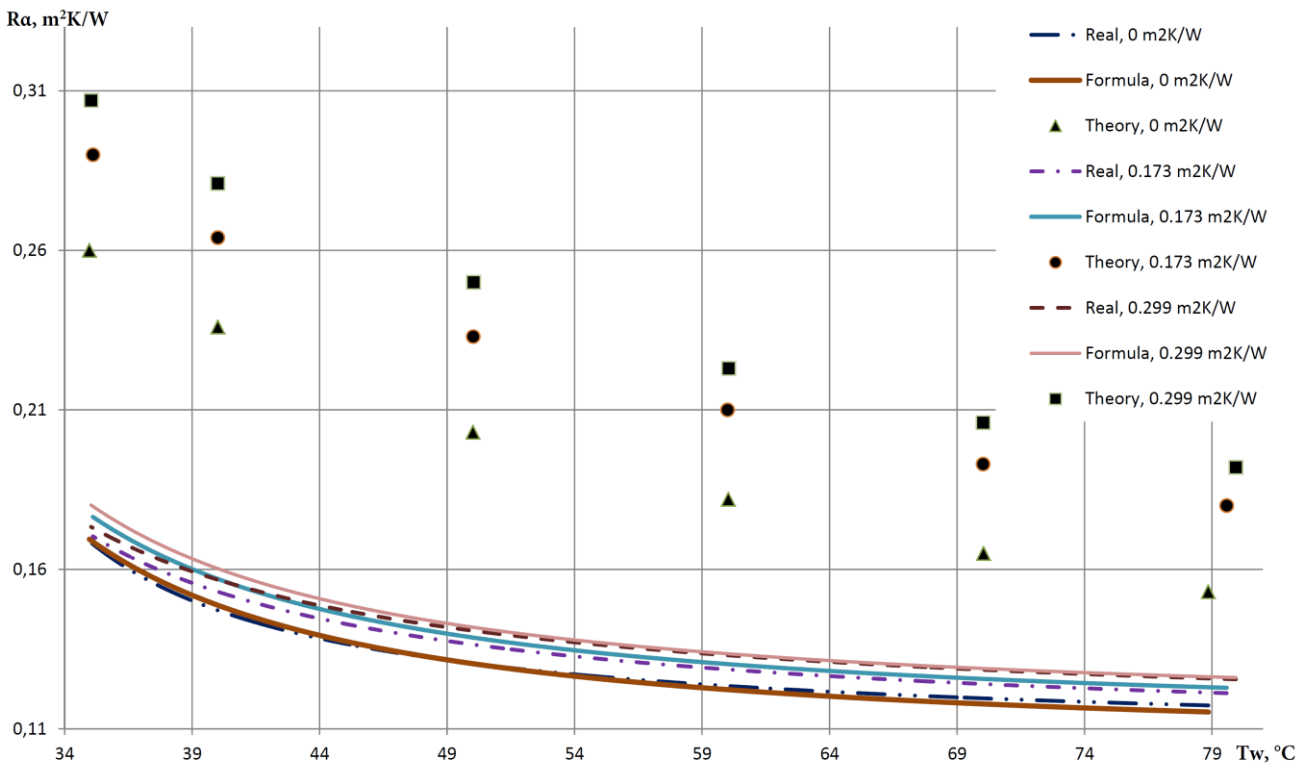


Рисунок 2 – Сумарний термічний опір тепловіддачі: дійсний (real); розрахований за запропонованою залежністю (formula); розрахований за критеріальними рівняннями (theor)

Як видно з рисунку 2 дослідні та розраховані дані різняться. Різниця в експериментальних та розрахованих за критеріальними рівняннями даних становить від 30 до 79 %. Це можна пояснити тим, що задача має нестационарний характер – температура води, її властивості та інші теплофізичні характеристики змінюються дискретно. При цьому даний метод потребує знань і вмінь користування спеціальним програмним забезпеченням. Враховувати вплив габаритних розмірів ємності на сумарний термічний опір тепловіддачі потрібно за допомогою поправкового коефіцієнта, який був виведений на основі теоретичних відомостей [1, 3]:

$$\varphi = 1,4735 \cdot H^{0,2486}$$

За визначальний розмір вертикальних циліндричних ємностей прийнято висоту.

Порівняння експериментальних та розрахованих за

запропонованою залежністю даних дає похибку, що не перевищує 3,9 %.

Наступним кроком було перенесення отриманих результатів за встановленою залежністю на посудини іншої ємності. Такими посудинами виступали баки для нагрівання води місткістю 40, 80 і 150 л. Температура навколишнього середовища при цьому лишалася такою ж – 20 °С. Досліди з баками повторювались не менше п'яти разів. Діапазон температур нагрівання/охолодження становив від 74 до 40 °С. Для врахування втрат через кришки бака, відповідно до рекомендацій літератури [2, 4], було прийнято, що сумарний термічний опір тепловіддачі через нижню кришку на 25 % більший ніж для циліндричної поверхні, а для верхньої кришки – на 25 % менший.

Контрольною величиною для порівняння результатів приймалася тривалість охолодження ємностей. Результати верифікації відображені на рисунках 3 та 4.

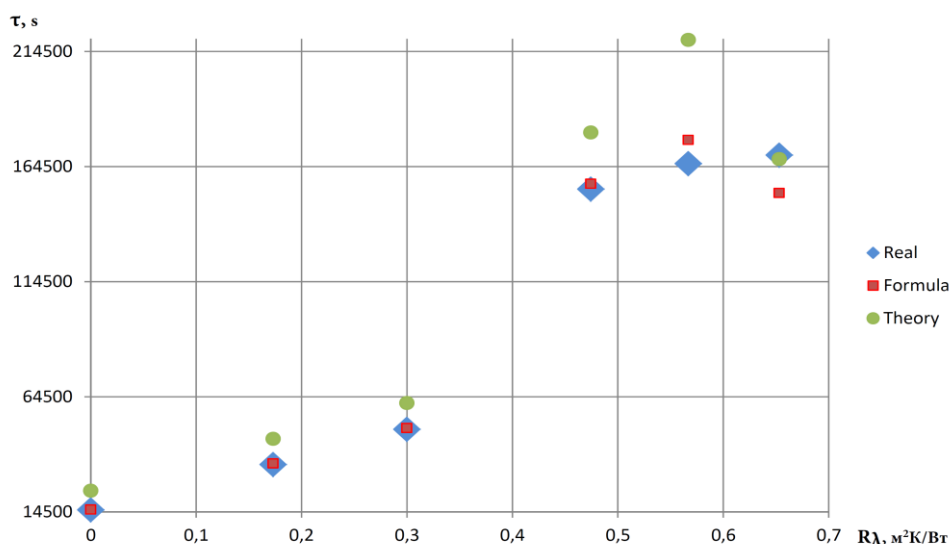


Рисунок 3 – Залежність тривалості охолодження від термічного опору теплопровідності: практичні дані (real), визначені за встановленою залежністю (formula), визначені за критеріальними рівняннями (theory)

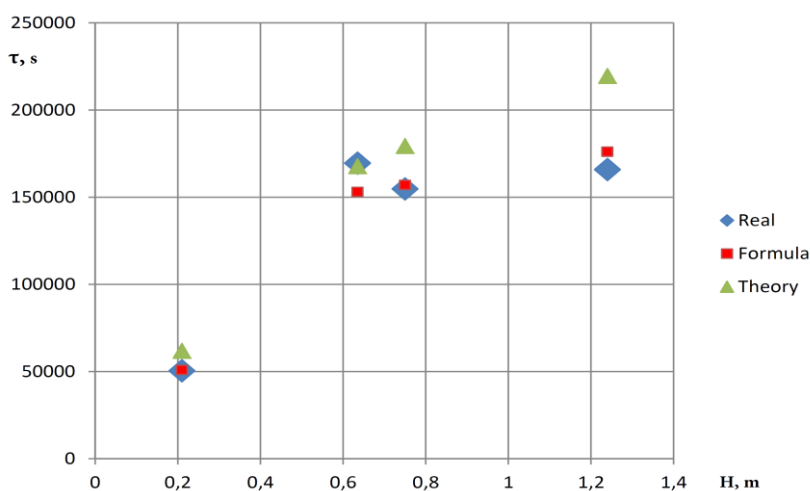


Рисунок 4 – Залежність тривалості охолодження від висоти ємності: практичні дані (real), визначені за встановленою залежністю (formula), визначені за теоретичними рекомендаціями (theory)

Дані верифікації показали, що відносна похибка при розрахунках за пропонованою залежністю коливається в межах 1...9,75%, а при розрахунках за критеріальними рівняннями становить 23...54%.

6 Висновки

Можна відзначити, що використання критеріальних рівнянь для розрахунку коефіцієнта теплопередачі, і як наслідок, втрат теплоти в ємності, не дає достовірного результату, похибка отриманих даних достатньо велика – до 80%. При цьому розрахунок громіздкий, трудомісткий і потребує знань та вмінь використання спеціалізованої обчислювальної техніки та прикладних програм. При цьому характер зміни величин термічного опору тепловіддачі, і як результат, характер зміни коефіцієнта теплопередачі, в процесі теплообміну близький до дійсності.

Запропонована залежність розрахунку коефіцієнта сумарного термічного опору тепловіддачі дає результати з достатньо високою точністю, похибка не перевищує 10 %. При цьому значно спрощується процес розрахунку. Граничні умови, для яких запропонована залежність, знаходяться в межах роботи реального обладнання.

На рисунку 5 (як приклад) наведено величину втрат при простоюванні накопичувача місткістю 150 л, з гарячою водою (65 °С) протягом 11,5 год, для різних товщин теплоізоляції виконаної з ППУ (від 5 до 30 мм).

На відміну від розрахунку за допомогою критеріальних рівнянь запропонована залежність і метод розрахунку на її основі дозволяє проводити розрахунки по оптимізації таких параметрів як товщина теплоізоляційного шару, тривалість охолодження ємності, кінцева температура води за заданий час охолодження з достатньою точністю для отримання відповіді про величину капітальних та експлуатаційних витрат та ін.

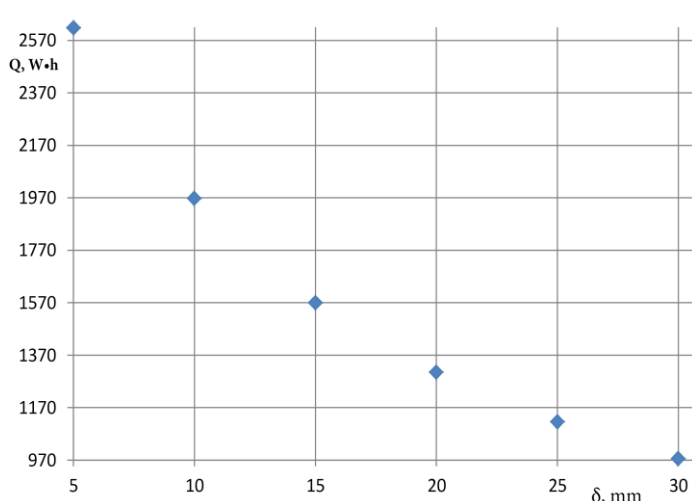


Рисунок 5 – Величина втрат тепла при різній товщині ізоляції за однаковий інтервал простоювання обладнання

Література

1. Баранов В.М. Термодинамика и теплопередача / В. М. Баранов, А.Ю. Коньков – Хабаровск: ДВГУПС, 2004. – 84 с.
2. Нащекин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащекин. – М.: Высшая школа, 1980. – 469 с.
3. Михеев А.М. Основы теплопередачи / А.М. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1973. – 392 с.
4. Исаченко В.Л. Теплопередача / В.Л. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 486 с.
5. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в термофизике. – Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 1982. – 280 с.

Отримана в редакції 09.10.2017, прийнята до друку 08.12.2017

Method of heat loss from vertical cylindrical tanks determination based on cumulative thermal resistance to heat transfer

S. A. Zadorozhny, S. G. Potapov, A. V. Forsiuk

National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine

e-mail: seregadom@ukr.net

The paper deals with the issue of heat accumulating tanks energy efficiency. This device is an essential element of heat supply system based on heat pumps. It ensures a full operation capacity of heat supply systems based on heat pumps of different arrangements, such as: soil-water, water-water, air-water. Systems based on heat pumps must meet a number of requirements: autonomy, maximum automation of all processes, quality and maximum energy efficiency. In addition, the effectiveness of the entire system depends on the efficiency of each element comprising such system. The parameter characterizing the efficiency of tank-accumulator is the minimum value of heat loss. A model of the experimental unit which allows to determine an empirical correlation has been developed. A considerable number of studies has been carried out covering the variation of ambient temperatures and different arrangements of the plant. On the basis of the obtained data actual values of total heat transfer thermal resistance were determined and an empirical equation for its calculation with minimum error has been derived. The proposed equation accounts for the change in the coolant temperature, the thermal resistance of the tank insulating envelope and temperature of the environment. Boundary conditions are as follows: water temperature in the tank varies within 80 to 40 °C; ambient temperature - 10 to 30 °C; the thermal resistance of the wall - from 0 to 0,8 (m² K) / W. A comparison has been made of the experimental data

obtained on the experimental model, data calculated based on the calculation of the overall heat transfer coefficient calculation to the existing method and data calculated by the proposed correlation. The difference between the experimental data and data calculated by the criterion equations falls from 30 to 79%. This can be explained by the fact that the problem has a non-stationary nature - water temperature, its properties and other thermophysical characteristics change discretely. Comparison of the same experimental data and data calculated according to the proposed correlation shown deviation from coincidence that did not exceed 3.9%. Verification of the obtained correlation has been carried out for the tanks of different volumes (capacities) and different dimensions under the same work conditions. The verification data shown that the relative error in the calculations by the proposed method varied within 1 ... 9,75%, whereas the calculations by the criterion equations gave error within- 23 ... 54%. In contrast to the calculation by means of criterion equations, the proposed correlation and the calculation method on its basis allowed to carry out optimization calculations of such parameters as the thickness of the thermal insulation, duration of cooling tanks, the final water temperature for a given cooling time with a sufficient accuracy to evaluate the magnitude of capital and operating costs, etc.

Keywords: Heat Pump; Tank-Accumulator; Boiler; Thermal Resistance to Heat Transfer

References

1. **Baranov, V. M., Kon'kov A. Yu.** (2004) *Termodinamika i teploperedacha*. Khabarovsk, DVGUPS, 84 p.
2. **Nashchekin V. V.** (1980) *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha*. Moskow, Vysshaya shkola, 469 p. (in Russian)
3. **Mikheyev, A. M., Mikheyeva, I. M.** (1973) *Osnovy teploperedachi*. Moskow, Energiya, 392 p. (in Russian)
4. **Isachenko, V. L., Osipova, V.A., Sukomel, A.S.** (1975) *Teploperedacha*. Moskow, Energiya, 486 p. (in Russian)
5. **Kutateladze, S. S.** (1982) *Analiz podobiya v termofizike*. Nauka, Sibirskoye otdeleniye, 280 p. (in Russian)

Received 09 October 2017

Approved 08 December 2017

Available in Internet 23 December 2017