



Issiqlik akkumulyatorining suyuqlik qatlamlarida harorat taqsimlanishining bir o'lovli modeli

Mirfayz S. Mirzaev^{1,a}, Behzod A. Hikmatov², Kamoliddin A. Samiyev³

^{1a)} PhD, dotsent, Buxoro davlat universiteti, Buxoro, 200117, O'zbekiston; m.s.mirzaev@buxdu.uz <https://orcid.org/0000-0002-6165-2358>

² Tayanch doktorant, Buxoro davlat universiteti, Buxoro, 200117, O'zbekiston; b.a.hikmatov@buxdu.uz <https://orcid.org/0000-0003-2625-2612>

³ DSc, katta ilmiy xodim, Buxoro davlat universiteti, Buxoro, 200117, O'zbekiston; ksamiev@buxdu.uz <https://orcid.org/0000-0002-3338-6208>

Dolzarbli: binolarda qayta tiklanuvchi energiya manbalariga asoslangan issiqlik energiyasini saqlash qurilmalaridan foydalanish energiyaga bo'lgan talabning qisman yoki to'liq qoplanishiga, energiya samaradorligiga erishishga, an'anaviy energiya tarmoqlariga bo'ladigan ortiqcha yuklamaning kamayishiga va atrof-muhitga chiqariladigan uglerod gazlarining miqdori kamayishiga xizmat qiladi. Issiqlik energiyasi saqlash qurilmalari orasida issiq suv saqlash tizimlari eng ko'p ishlatiladigan qurilmalar hisoblanadi hamda issiqlik akkumulyatori (issiqlik suv saqlash baki) ning zaryadlanish vaqti, issiqlik qatlamlarida harorat o'zgarishi va yarim siklli qiymat ko'rsatkichlari samaradorligini baholashda asosiy parametrlarning bir qismini tashkil qiladi. Issiq suv saqlash baklarining energiya samaradorligini baholashda matematik modellashirishning ahamiyati juda katta.

Maqsad: silindrsimon issiq suv saqlash bakining bir o'lovli modeli yordamida zaryadlanish vaqtiga, suyuqlik qatlamlarida harorat taqsimlanishiga hamda yarim siklli qiymat ko'rsatkichiga kiruvchi suyuqlik massa oqimining ta'sirini o'rganish va tahlil qilish.

Usullar: issiq suv saqlash bakini bir o'lovli modellashirish.

Natijalar: issiq suv saqlash bakida zaryadlanish jarayoni uchun kiruvchi suyuqlik massa oqimining $\dot{m}_1=0.18 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_2=0.15 \text{ kg/s}$ va $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ qiymatlarida zaryadlanish vaqtlari mos ravishda 10.5, 16.33 va 21 minutni tashkil qilgan. Issiq suv saqlash baki uchun yarim siklli qiymat ko'rsatkichlari ($FOM_{1/2}$) esa mos ravishda 76.03%, 92.58% va 94.03% teng bo'lgan. $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ massa oqim tezligida issiq suv saqlash bakining energiya samaradorligi yuqori bo'lishi aniqlandi.

Kalit so'zlar: issiq suv saqlash baki, modellashirish, yarim siklli qiymat ko'rsatkichi, oqim tezligi, issiqlik taqsimlanishi, zaryadlanish vaqti.

Одномерная модель распределения температуры в слоях жидкости теплового аккумулятора

Мирфайз С. Мирзаев^{1,а}, Бехзод А. Хикматов², Камолитдин А. Самиев³

^{1a)} Кандидат технических наук, доцент, Бухарский государственный университет, Бухара, 200117, Узбекистан; m.s.mirzaev@buxdu.uz <https://orcid.org/0000-0002-6165-2358>

² Аспирант, Бухарский государственный университет, Бухара, 200117, Узбекистан; b.a.hikmatov@buxdu.uz <https://orcid.org/0000-0003-2625-2612>

³ Доктор технических наук, старший научный сотрудник, Бухарский государственный университет, Бухара, 200117, Узбекистан; ksamiev@buxdu.uz <https://orcid.org/0000-0002-3338-6208>

Актуальность: использование в зданиях накопителей тепловой энергии на основе возобновляемых источников энергии позволяет частично или полностью покрыть энергетический спрос, достичь энергоэффективности, снизить нагрузку на традиционные энергетические сети и сократить выбросы углекислого газа в окружающую среду. Среди накопителей тепловой энергии наиболее широкое распространение получили накопители горячей воды, а время зарядки теплового аккумулятора (аккумулятора горячей воды), изменение температуры в тепловых слоях и значения полупериода являются одними из основных параметров оценки эффективности. Значение математического моделирования при оценке энергоэффективности накопителей горячей воды весьма велико.

Цель: изучить и проанализировать влияние расхода поступающей жидкости на время зарядки, распределение температуры в слоях жидкости и показатель полупериода с использованием одномерной модели цилиндрического бака-аккумулятора горячей воды.

Методы: одномерное моделирование резервуара для хранения горячей воды.

Результаты: при зарядке резервуара для хранения горячей воды время зарядки составило 10,5, 16,33 и 21 минуту при значениях массового расхода входящей жидкости $\dot{m}_1 = 0.18 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_2 = 0.15 \text{ kg/s}$ и $\dot{m}_3 = 0.12 \text{ kg/s}$ соответственно. Коэффициент Полезного Действия (FOM) за полупериод для резервуара для хранения горячей воды составил 76,03, 92,58 и 94,03% соответственно. Установлено, что энергоэффективность резервуара для хранения горячей воды была высокой при массовом расходе $\dot{m}_3 = 0.12 \text{ kg/s}$.

Ключевые слова: бак-аккумулятор горячей воды, моделирование, показатель качества полупериода, расход, распределение тепла, время зарядки.

For citation: M.S. Mirzaev, B.A. Khikmatov, K.A.Samiev. One-dimensional model of temperature distribution in liquid layers of a heat accumulator. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3, pp. 77-86.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23206988>

Received: 19.01.2026
Revised: 15.02.2026
Accepted: 18.03.2026
Published: 25.09.2026

Copyright: © Mirfayz S. Mirzaev, Behzod A. Khikmatov, Kamoliddin A. Samiev, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



One-dimensional model of temperature distribution in liquid layers of a heat accumulator

Mirfayz S. Mirzaev^{1,a}, Behzod A. Khikmatov², Kamoliddin A. Samiev³

^{1,a}) PhD, assoc.prof., Bukhara State University, Bukhara, 200117, Uzbekistan; m.s.mirzaev@buxdu.uz <https://orcid.org/0000-0002-6165-2358>

² PhD student, Bukhara State University, Bukhara, 200117, Uzbekistan; b.a.hikmatov@buxdu.uz <https://orcid.org/0000-0003-2625-2612>

³ DSc, senior researcher., Bukhara State University, Bukhara, 200117, Uzbekistan; ksamiev@buxdu.uz <https://orcid.org/0000-0002-3338-6208>

Relevance: the use of thermal energy storage devices based on renewable energy sources in buildings serves to partially or fully cover energy demand, achieve energy efficiency, reduce the overload on traditional energy networks and reduce the amount of carbon dioxide emitted into the environment. Among thermal energy storage devices, hot water storage systems are the most widely used devices, and the charging time of the heat accumulator (hot water storage tank), temperature changes in thermal layers and half-cycle values are some of the main parameters in assessing efficiency. The importance of mathematical modeling in assessing the energy efficiency of hot water storage tanks is very great.

Aim: to study and analyze the effect of the incoming liquid mass flow on the charging time, temperature distribution in the liquid layers, and the half-cycle value indicator using a one-dimensional model of a cylindrical hot water storage tank.

Methods: one-dimensional modeling of a hot water storage tank.

Results: For the charging process in the hot water storage tank, the charging times were 10.5, 16.33 and 21 minutes at the values of the incoming liquid mass flow rate $\dot{m}_1=0.18 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_2=0.15 \text{ kg/s}$ and $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$, respectively. The half-cycle figure of merit, ($FOM_{1/2}$) for the hot water storage tank were 76.03%, 92.58% and 94.03%, respectively. It was found that the energy efficiency of the hot water storage tank was high at the mass flow rate $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$.

Keywords: hot water storage tank, modeling, half-cycle figure of merit, flow rate, heat distribution, charging time.

1. Kirish (Introduction)

Binolarda isitish va sovutish maqsadida sarflanadigan energiya iste'moli global energiya iste'molining 30 % idan 40 % igacha bo'lgan qiymatini qabul qiladi hamda global energiya bilan bog'liq CO₂ gazlarining 26 % ini tashkil qiladi [1-3]. Bino yoki sanoat issiqlik energiyasiga bo'lgan ehtiyojni qayta tiklanadigan energiya manbalari, masalan, quyosh, shamol yoki geotermal energiya kabilar hisobidan ta'minlashda katta salohiyat mavjud [4-5]. Biroq, qayta tiklanadigan energiya manbalarining energiya berish vaqti va energiyaga bo'lgan ehtiyoj o'rtasida odatda paydo bo'ladigan vaqtinchalik nomuvofiqlik (tungi yoki bulutli paytlarda quyosh energiyasining mavjud emasligi; shamol tezligining o'zgaruvchanligi va boshqalar) tufayli issiqlik energiyasini saqlash (Thermal Energy Storage - TES) qurilmalaridan foydalanishga ehtiyoj paydo bo'ladi [6-9]. Issiqlik energiyasini saqlash (TES) qurilmalaridan foydalanish issiqlik ta'minoti va talab o'rtasidagi nomuvofiqlikni bartaraf etishda istiqbolli alternativ bo'lib, u issiqlikni soatbay, kunlik, haftalik va mavsumiy davrda saqlashi mumkin [10-13]. Issiqlik energiyasini saqlash (TES) qurilmalaridan foydalanish orqali elektr energiyasining eng yuqori va eng past narxlariga belgilangan vaqt oraliklarida energiya sarfini tejash, elektr tarmoqlariga yuklamani kamaytirish, energiya yetkazib berish barqarorligini oshirish, atrof-muhitga salbiy ta'sir qiluvchi uglerod chiqindilarini kamaytirish va energiya manbalaridan kompleks foydalanishga erishish mumkin [14-15].

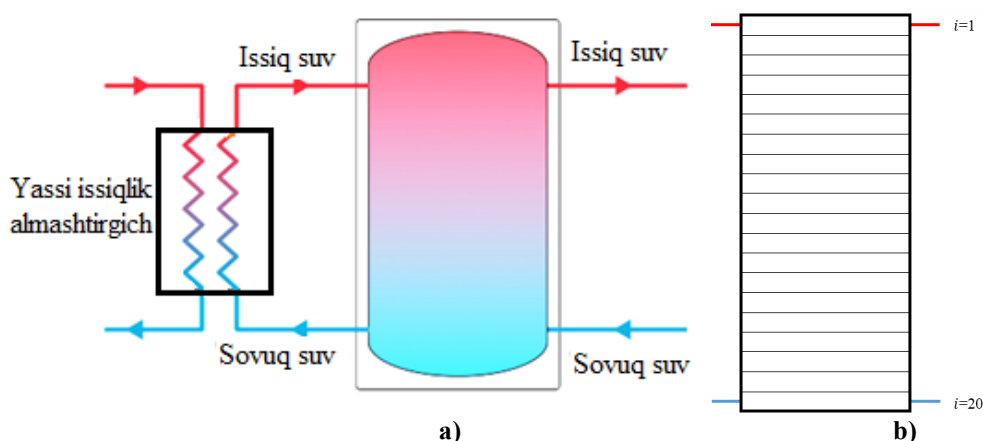
Issiqlik energiyasi saqlash (TES) qurilmalari orasida quyosh energiyasiga asoslangan issiq suv saqlash tizimlari maishiy issiq suvga bo'lgan ehtiyojni toza, samarali, ishonchli va barqaror energiya manbai bilan ta'minlashi hisobiga eng ko'p ishlatiladigan quyosh issiqlik energiyasi qurilmalari hisoblanadi, hamda issiq suv saqlash bakidagi issiqlik qatlamlarida harorat o'zgarishi asosiy tadqiqot yo'nalishi bo'lib kelmoqda [16-20]. Issiqlik energiyasi saqlash (TES) qurilmalari tadqiqotlari eksperimental, raqamli simulyatsiya yoki ikkalasining kombinatsiyasi shaklida amalga oshirilishi mumkin bo'lib, ko'plab eksperimental va raqamli tadqiqotlarda TES tizimlarining ishlashiga issiq suv bakining o'lchamlari, massa oqimi tezligi, kiruvchi suyuqlik harorati, suyuqlik kirish joyining joylashuvi va suyuqlik harakatiga qarshilik ko'rsatuvchi to'siqlar kabi faktorlarning ta'siri o'rganilgan [21]. Jumladan, Iván De la Cruz-Loredo va boshqalar [22] issiq suv issiqlik energiyasini saqlash bakining MATLAB/Simulink dasturida 12 tugunli fazoviy o'lchamlarga ega gibrid bir o'lchovli ko'p tugunli issiq suv baki modelini ishlab chiqishgan hamda 12 va 60 tugunli fazoviy o'lchamlarga ega standart ko'p tugunli tank modeli bilan taqqoslangan. K. Kumar va boshqalar [23] vertikal issiq suv saqlash bakida issiqlik qatlamlanishining ikki o'lchovli modelini ASYS Fluent (CFD) yordamida o'rganilgan. J. Rendal va boshqalar [24] issiqlik saqlash baklarida issiqlik qatlamlanishini modellashtirishda konveksiyaga asoslangan o'lchovsiz sonlar (Richardson soni, Peklet soni va boshqalar) ning Reynolds soniga bog'liqligini aniqlashgan. P.D. van Schalkwyk va boshqalar [25] gorizontal elektr issiq suv saqlash

baklarida issiqlik tarqalishining turli usullarini raqamli modellashirilgan. Huimin Feng va boshqalar [26] silindrlil termoklin (issiq va sovuq suv qatlamlari o'rtasida termik o'tish zonasi [27] suv saqlash bakida issiqlik qatlamlanishi ko'rsatkichlarining uch o'lchovli raqamli simulyatsiyasini o'rganishgan. Baihong Liu va boshqalar [28] quyosh energiyasiga asoslangan issiq suv saqlash baklarida issiqlik qatlamlanishining miqdorini aniqlash va uning energiya samaradorligiga ta'sirini eksperimental va raqamli o'rganishgan. Aowabin Rahman va boshqalar [29] ikkita ichki issiqlik almashtirgichga ega issiq suv saqlash bakining bir o'lchovli modelini ishlab chiqqan.

Ushbu ishda silindrsimon issiq suv saqlash bakining bir o'lchovli modeli Yelizaveta Karlina [30] va Austin L. Nash [31] tadqiqotlaridagi eksperimental tajrabalar va raqamli modellashirish natijalari asosida ishlab chiqqan va issiq suv saqlash bakining zaryadlanish vaqti, suyuqlik qatlamlarida harorati taqsimlanishi hamda yarim siklli qiymat ko'rsatkichi (Half-cycle figure of merit, $FOM_{1/2}$) zaryadlanish jarayoni uchun raqamli tahlil qilingan. Bir o'lchovli modelda issiqlik balans tenglamalari tuzilib, differensial tenglamalar ayirmali sxema metodi yordamida sonli usulda yechilgan. Issiq suv saqlash bakining zaryadlanish vaqtiga va suyuqlik qatlamlarida harorat taqsimlanishiga kiruvchi suyuqlik massa oqimining ta'siri o'rganilgan.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Yelizaveta Karlina va boshqalar [30] issiq suv saqlash bakida issiqlik tabaqalanishining bir o'lchovli modelini ishlab chiqqan. 1-rasmda silindrsimon issiq suv saqlash bakining sxematik tasviri berilgan bo'lib, bu konfiguratsiyada tank ichidagi issiqlik almashtirgich mavjud emas deb qaraladi. Issiq suv saqlash bakiga ulangan tashqi issiqlik manbaida isitiladigan issiq suv idishning yuqori qismidan kiritiladi, issiqlik almashtirgichga qaytariladigan sovuq suv tankning pastki qismidan olinadi. Ushbu konfiguratsiyada issiqlik almashtirgichning tashqi qismida joylashishi issiq suv saqlash bakiga texnik xizmat ko'rsatishni qulay qiladi, issiq suv saqlash bakining ichki tuzilishini buzmasdan sodda ta'mirlash yoki o'zgartirish imkonini beradi, natijada uni mavjud tizimlarda modernizatsiya qilish uchun qiyinchilik tug'dirmaydi.



1-rasm. Issiq suv saqlash baki: a) umumiy konfiguratsiya; b) suyuqlik qatlamlari yuqoridan pastgacha 1 dan 20 tagacha qabul qilindi.

Fig.1. Hot water storage tank: a) general configuration; b) the number of liquid layers was set from 1 to 20, from top to bottom.

Issiq suv saqlash bakining bir o'lchovli matematik modelini ishlab chiqqan va tasdiqlash uchun Austin L. Nash va boshqalar [31] eksperimental tadqiqotlaridagi ma'lumotlardan foydalanildi. Issiq suv saqlash bakining tashqi balandligi 1.42 m, ichki qismi balandligi esa 1.30 m ga teng. Ichki va tashqi diametrlari mos ravishda 0.38 m va 0.51 m ga teng. Issiq suv saqlash bakining umumiy sig'imi 151 litr.

Issiqlik balans tenglamalari. Issiq suv saqlash bakining 1-rasmda ko'rsatilgan konfiguratsiyasi uchun energiya balans tenglamalari ishlab chiqqan [30].

$$C_w m_{w_i} \frac{dT_{w_i}}{dt} = \dot{Q}_{c,w_i} + \dot{Q}_{cf,w_i} - \dot{Q}_{loss_i} - \dot{Q}_{hwc} \quad (1)$$

Bu yerda tenglamada C_w – suvning solishtirma issiqlik sig'imi; m_{w_i} – har bir qatlamdagi suvning massasi; $\dot{Q}_{c,w_i}$ – suyuqlik qatlamlari orasidagi konvektiv issiqlik uzatish tezligi; $\dot{Q}_{cf,w_i}$ – suvning to'g'ridan-to'g'ri issiq suv saqlash bakiga qo'shilishi va olinishi tufayli majburiy konvektiv issiqlik uzatish tezligi; $\dot{Q}_{loss_i}$ – atrof-muhitga issiqlik yo'qotish darajasi; $\dot{Q}_{hwc}$ – issiq suv olinishi va sovuq suv qo'shilishi tufayli majburiy konvektiv issiqlik uzatish tezligi; i – tankdagi suyuqlik qatlamlarini bildiradi. Issiq suv saqlash baki ichidagi suv qatlami 20 ta teng qatlamga bo'lingan deb qabul qilingan va mos ravishda i 1 dan 20 gacha qiymatlarni qabul qiladi.



Suyuqlik qatlamlari orasidagi konvektiv issiqlik uzatish tezligi $\dot{Q}_{c,w_i}$ quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\dot{Q}_{c,w_i} = \left(\frac{(T_{w_{i+1}} - T_{w_i})k_w \Delta_{i+1}}{L_w} + \frac{(T_{w_{i-1}} - T_{w_i})k_w \Delta_{i-1}}{L_w} \right) A_w \quad (2)$$

bunda A_w - tankning ko'ndalang kesimi maydoni; Δ - Moslashuvchan Grid multiplikatori; k_w - suvning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti;

Qatlamlar orasidagi issiqlik uzatish tezligi $\dot{Q}_{c,w_i}$ ni hisoblashda K. Powell va boshqalar [32] tomonidan taqdim etilgan Adaptiv Grid yondashuvidan foydalanilgan, bu esa harorat farqi mavjud bo'lganda qatlamlar orasidagi aralashuvni oshirish orqali issiqlik uzatishni kuchaytiradi. Ushbu ishda eksperimental natijalar asosida $\Delta=1/400$ qiymatida tabiiy konveksiya effektlarini yanada realroq joylashtirish orqali issiq suv saqlash bakida yanada samarali tabaqalanish imkonini beradi deb qabul qilingan [30, 31].

Suvning to'g'ridan-to'g'ri issiq suv saqlash bakiga qo'shilishi va olinishi tufayli majburiy konvektiv issiqlik uzatish tezligi $\dot{Q}_{cf,w_i}$ quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\dot{Q}_{cf,w_i} = \dot{m} C_w (T_{w_{i-1}} - T_{w_i}) \quad (3)$$

bunda $\dot{m}$ - kiruvchi suvning massa oqim tezligi.

Suvning to'g'ridan-to'g'ri issiq suv saqlash bakiga qo'shilishi va olinishi tufayli majburiy konvektiv issiqlik uzatish tezligi $\dot{Q}_{cf,w_i}$ kiruvchi issiq suv tufayli yuqori qatlamlardagi harorat o'zgarishi tezligini ifodalaydi, issiq suv saqlash bakining devorlari orqali atrof-muhitga issiqlik yo'qotilishini bartaraf etish orqali issiqlik samaradorligini oshiradi.

Atrof-muhitga issiqlik yo'qotish darajasi $\dot{Q}_{loss_i}$ quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\dot{Q}_{loss_i} = \frac{A_{wall_i} k_{ti} (T_{w_i} - T_{room})}{L_{ti}} \quad (4)$$

bunda T_{room} - issiq suv saqlash baki joylashgan xona haroratini ifodalaydi. Atrof-muhitga issiqlik yo'qotish darajasi $\dot{Q}_{loss_i}$ har bir qatlam uchun alohida issiq suv saqlash bakining izolyatsiyasi xususiyatlariga, shu jumladan izolyatsiya qalinligi va ta'sir qilish yuzasiga qarab hisoblab chiqiladi. Oraliq qatlamlar uchun ($2 \leq i \leq 18$) A_{wall_i} yuza issiq suv saqlash bakining yon tomoni yuzasini ifodalaydi, yuqori ($i = 1$) va pastki ($i = 20$) qatlamlar uchun esa issiq suv saqlash bakining yon tomoni yuzasi va yuqori/pastki asos yuzalarini o'z ichiga oladi.

Issi suv olinishi va sovuq suv qo'shilishi tufayli majburiy konvektiv issiqlik uzatish tezligi $\dot{Q}_{hwc}$ quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\dot{Q}_{hwc} = C_w (T_{w_{20}} - T_{cold}) \dot{m}_{t,fraction} \quad (5)$$

bunda $\dot{m}_{t,fraction}$ - suyuqlikning nisbiy oqim tezligi bo'lib, quyidagicha topiladi:

$$\dot{m}_{t,fraction} = \dot{m}_t \cdot fraction \quad (6)$$

$\dot{m}_t$ - issiq suvning umumiy iste'mol darajasini, $fraction$ esa issiq suv ulushini ifodalaydi:

$$fraction = \frac{(T_{use} - T_{cold})}{(T_{w_0} - T_{cold})} \quad (7)$$

(7) ifodadagi T_{use} - iste'molchi uchun talab qilinadigan harorat, T_{w_0} - issiq suv saqlash bakining suv olinadigan yuqori qatlam harorati, T_{cold} - issiq suv saqlash bakining pastki qatlamiga kiruvchi sovuq suv harorati.

Demak, issiq suv olinishi va sovuq suv qo'shilishi tufayli majburiy konvektiv issiqlik uzatish tezligi $\dot{Q}_{hwc}$ issiq suv saqlash bakining pastgi qatlamidan suv olishning issiqlik taqsimotiga aniq ta'sirini baholash uchun zarur va kiruvchi sovuq suv harorati T_{cold} ga bog'liq. $\dot{Q}_{hwc}$ odatda issiq suv saqlash bakining pastki ikki qatlamiga yoki faqatgina eng oxirgi qatlamiga ta'sir qiladi deb hisoblanadi.

Ushbu issiqlik balans tenglamasi differensial tenglamalarni ayirmali sxema metodidan foydalangan holda sonli usulda yechildi. Ushbu issiqlik balans tenglamalarini yechishda quyidagi shartlar qabul qilingan:

- Issiq suv saqlash bakiga tashqi issiqlik manbaidan kiruvchi issiq suv yuqori (birinchi) qatlamdan kiradi va harorati 45°C ga teng.
- Issiq suv saqlash bakining pastki qatlamiga kiruvchi sovuq suv harorati faqat yigirmanchi qatlamga ta'sir qiladi va harorati 15°C ga teng.
- Issiq suv saqlash bakidagi har bir qatlamning dastlabki haroratlari bir xil va 20°C ga teng.
- Hisob-kitoblarda $fraction$ doimiy 0.92 ga teng deb qabul qilingan.

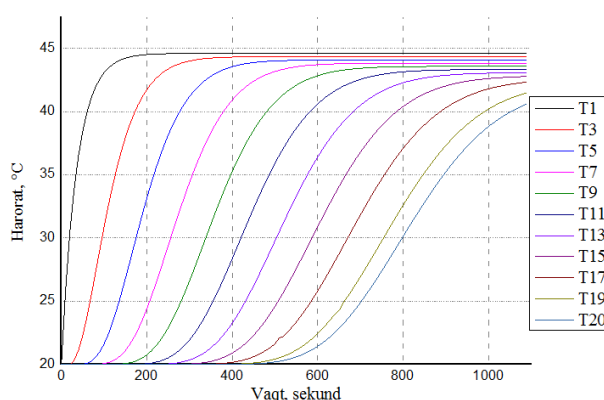
Yarim siklli qiymat ko'rsatkichi (Half-cycle figure of merit, $FOM_{1/2}$). Yarim siklli qiymat ko'rsatkichi ($FOM_{1/2}$) issiq suv saqlash bakining faqat zaryadlash yoki razryadlanish jarayonlari paytidagi samaradorlikni miqdoriy jihatdan aniqlaydigan o'lchovsiz kattalik bo'lib, bu integral zaryadlash yoki foydali (real) issiqlik miqdorining nazariy (ideal) issiqlik iqdoriga nisbati sifatida belgilanadi [14]:

$$FOM_{1/2} = \frac{\int_0^t \dot{m} C_w (|T'_{in} - T'_{out}|)}{M C_w (T_{in} - T_{out})} \quad (8)$$

bunda T'_{in} va T'_{out} mos ravishda issiq suv saqlash bakiga haqiqiy kiruvchi va chiquvchi suyuqlik haroratini ifodalaydi, T_{in} va T_{out} mos ravishda issiq suv saqlash bakiga kiruvchi nazariy jihatdan ideal bo'lgan kiruvchi va chiquvchi suyuqlik haroratini ifodalaydi, M issiq suv saqlash bakidagi suvning umumiy massasi.

3. Natijalar (Results)

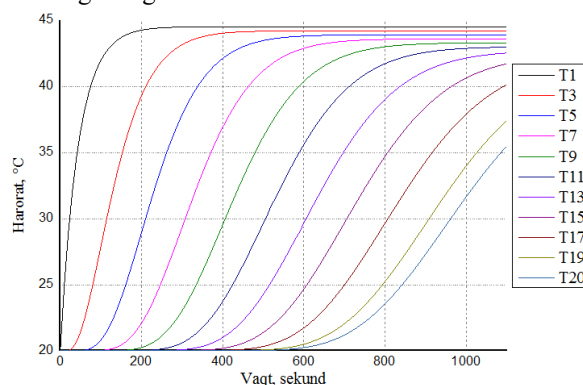
Issiq suv saqlash bakining zaryadlanish vaqti va qatlamlardagi harorat taqsimlanishi va yarim siklli qiymat ko'rsatkichi ($FOM_{1/2}$) kiruvchi massa oqimining 3 ta qiymati uchun: $\dot{m}_1 = 0.18 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_2 = 0.15 \text{ kg/s}$ va $\dot{m}_3 = 0.12 \text{ kg/s}$ bo'lgan hollarda raqamli tahlil qilindi [30, 31]. Bunda issiq suv saqlash bakida suyuqlik teng 20 ta qatlamga bo'lingan deb hisoblandi. Issiq suv saqlash bakiga tashqi issiqlik manbasidan 45°C li issiq suv to'g'ridan-to'g'ri yuqoridan birinchi qatlamga $\dot{m}_1 = 0.18 \text{ kg/s}$ oqim tezligi bilan kiradi. Issiq suv saqlash baki to'liq zaryadlanishi uchun to'la zaryadlanish nuqtasi sifatida issiq suv saqlash bakiga kiruvchi suv haroratining o'rtacha 90 foizi (40.5°C) ga erishgan vaqt qabul qilindi. Shunda issiq suv saqlash bakining $\dot{m}_1 = 0.18 \text{ kg/s}$ massa oqimi tezligi bo'lgan holdagi zaryadlanish vaqti 630 soniyani yoki 10.5 minutni tashkil qildi. 2-rasmda issiq suv saqlash bakining $\dot{m}_1 = 0.18 \text{ kg/s}$ massa oqimi tezligida suyuqlik qatlamlarida harorat o'zgarishi tasvirlangan. Suyuqlik qatlamlari sifatida toq sonli qatlamlar va oxirgi yigirmanchi qatlam olingan. $FOM_{1/2}$ ning qiymati 76,13 % ga teng bo'ldi.



2-rasm. Issiq suv saqlash bakining $\dot{m}_1 = 0.18 \text{ kg/s}$ massa oqimi tezligida suyuqlik qatlamlarida harorat o'zgarishi.

Fig.2. Temperature change in the liquid layers of a hot water storage tank at a mass flow rate of $\dot{m}_1 = 0.18 \text{ kg/s}$.

Issiq suv saqlash bakiga tashqi issiqlik manbasidan 45°C li issiq suv to'g'ridan-to'g'ri yuqoridan birinchi qatlamga $\dot{m}_2 = 0.15 \text{ kg/s}$ oqim tezligi bilan kirgan hol uchun zaryadlanish vaqti 980 soniyani yoki 16.33 minutni tashkil qildi. 3-rasmda issiq suv saqlash bakining $\dot{m}_2 = 0.15 \text{ kg/s}$ massa oqimi tezligida suyuqlik qatlamlarida harorat o'zgarishi tasvirlangan. $\dot{m}_2 = 0.15 \text{ kg/s}$ massa oqimi tezligida $FOM_{1/2}$ ning qiymati 92.58 % ga teng bo'ldi.



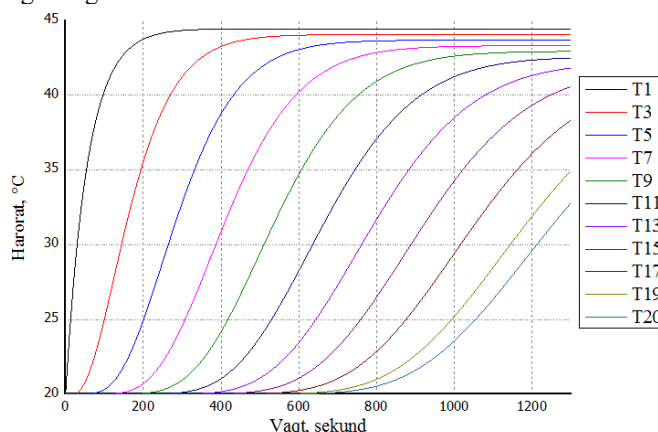
3-rasm. Issiq suv saqlash bakining $\dot{m}_2 = 0.15 \text{ kg/s}$ massa oqimi tezligida suyuqlik qatlamlarida harorat o'zgarishi.

Fig.3. Temperature change in the liquid layers of a hot water storage tank at a mass flow rate of $\dot{m}_2 = 0.15 \text{ kg/s}$.

Issiq suv saqlash bakiga tashqi issiqlik manbasidan 45°C li issiq suv to'g'ridan-to'g'ri yuqoridan birinchi qatlamga $\dot{m}_3 = 0.12 \text{ kg/s}$ oqim tezligi bilan kirgan hol uchun zaryadlanish vaqti 1260 soniyani



yoki 21 minutni tashkil qildi. 4-rasmda issiq suv saqlash bakida $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ massa oqimi tezligida suyuqlik qatlamlarida harorat o'zgarishi tasvirlangan. $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ massa oqimi tezligida $FOM_{1/2}$ ning qiymati 94.03 % ga teng bo'ldi.



4-rasm. Issiq suv saqlash bakining $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ massa oqimi tezligida suyuqlik qatlamlarida harorat o'zgarishi.

Fig.4. Temperature change in the liquid layers of a hot water storage tank at a mass flow rate of $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$.

4. Munozara (Discussion)

Natijalarga ko'ra kiruvchi suyuqlik massa oqimi $\dot{m}_3$ dan $\dot{m}_1$ dan oshgani sari zaryadlanish vaqti qisqaradi: $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ da zaryadlanish vaqti 21 minutni, $\dot{m}_2=0.15 \text{ kg/s}$ da zaryadlanish vaqti 16.33 minutni, $\dot{m}_1=0.18 \text{ kg/s}$ da zaryadlanish vaqti 10.5 minutni tashkil qiladi. Mos ravishda issiq suv saqlash bakidagi suyuqlik qatlamlarining harorati ham boshlang'ich haroratga nisbatan tezroq kiruvchi suyuqlik haroratiga intiladi.

Biroq issiq suv saqlash baki uchun yarim siklli qiymat ko'rsatkichi ($FOM_{1/2}$) yuqoridagi uchta massa oqimi uchun: $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ da 94.03% ga, $\dot{m}_2=0.15 \text{ kg/s}$ da 92.58% ga, $\dot{m}_1=0.18 \text{ kg/s}$ da 76.03% ga teng bo'ldi. Ya'ni issiq suv saqlash bakiga kiruvchi suyuqlik massa oqimi 0.12 kg/s dan 0.18 kg/s ga oshishi zaryadlanish vaqtining 2 baravarga qisqarishiga sabab bo'lsada, yarim siklli qiymat ko'rsatkichi ($FOM_{1/2}$) 94.03% dan 76.03% ga tushishiga olib keladi. Bu esa issiq suv saqlash bakining zaryadlanish jarayonidagi samaradorligiga salbiy ta'sir qiladi. Buni issiq suv saqlash bakidagi past oqim tezligida issiqlik almashinuvi jarayonining sekinlashishi tufayli suyuqlik qatlamlarida issiqlik uzatilishining cheklanishi bilan tushuntirish mumkin. Oqim tezligi o'rtacha darajada bo'lganda issiqlik uzatish samaraliroq bo'ladi va issiqlik almashinuvining tezroq kechadi, mos ravishda zaryadlanish vaqti qisqaradi. Biroq, oqim tezligining oshib borishi bilan issiq suv saqlash baki ichidagi turbulentlik kuchayadi, bu samarali issiqlik uzatishni kamaytiradi va suyuqlikning issiq suv saqlash bakida "qolish vaqtini" qisqartiradi (issiqlik tashuvchi suyuqlik o'zining issiqlik energiyasini issiq suv saqlash bakidagi suvga to'la bera olmay chiqib ketadi). Bu issiqlik almashinuvi samaradorligiga salbiy ta'sir qiladi va yarim siklli qiymat ko'rsatkichi ($FOM_{1/2}$) ning pasayishiga olib keladi.

5. Xulosa (Conclusion)

Ushbu ishda silindrsimon issiq suv saqlash bakining bir o'lchovli modeli Yelizaveta Karlina [30] va Austin L. Nash [31] tadqiqotlaridagi eksperimental tajrabalar va raqamli modellashirish natijalari asosida ishlab chiqildi. Issiq suv saqlash bakining zaryadlanish vaqtiga, qatlamlardagi harorat taqsimlanishiga va Yarim siklli qiymat ko'rsatkichi ($FOM_{1/2}$) qiymatiga kiruvchi suyuqlik massa oqimining turli qiymatlari ta'siri o'rganildi. Bunda kiruvchi suyuqlikning 3 ta qiymati: $\dot{m}_1=0.18 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_2=0.15 \text{ kg/s}$ va $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ bo'lgan hollar issiq suv saqlash bakida zaryadlanish jarayoni uchun raqamli tahlil qilindi va quyidagi natijalar olindi:

- Issiq suv saqlash bakiga kiruvchi suyuqlik massa oqimi $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ da zaryadlanish vaqti 21 minutni, $\dot{m}_2=0.15 \text{ kg/s}$ da zaryadlanish vaqti 16.33 minutni, $\dot{m}_1=0.18 \text{ kg/s}$ da zaryadlanish vaqti 10.5 minutni tashkil qilgan.

- Issiq suv saqlash baki uchun yarim siklli qiymat ko'rsatkichi ($FOM_{1/2}$) $\dot{m}_3=0.12 \text{ kg/s}$ da 94.03% ga, $\dot{m}_2=0.15 \text{ kg/s}$ da 92.58% ga, $\dot{m}_1=0.18 \text{ kg/s}$ da 76.03% ga teng bo'ldi. Natijalarga ko'ra massa oqimi tezligi 0.15 kg/s dan 0.18 kg/s ga oshganda ($FOM_{1/2}$) ning qiymati keskin tushib ketadi. 0.12 kg/s dan 0.15 kg/s oralig'ida esa ($FOM_{1/2}$) ning qiymati 90% dan yuqorilgicha qoladi. Issiq suv saqlash baki uchun shu oraliq maqbul ish rejimi sifatida tavsiya etiladi,



- Issiq suv saqlash bakining suyuqlik qatlamlarida harorat o'zarishining vaqtga bog'liq ravishda o'zgarishi aniqlandi. Issiq suv saqlash bakining 1-qatlami harorati eng tez ko'tarilsa, pastki qatlamlarda harorat o'zgarishi sekin ro'y beradi.

Keyingi tadqiqotlarda issiq suv saqlash bakida issiqlik samaradorligini oshirish uchun strukturaviy dizayn, izolyatsiya qatlamlari, kiruvchi suyuqlik harorati va oqim tezligi, zaryadlanish va razryadlanish vaqtiga bog'liq raqamli tadqiqotlar o'tkaziladi.

ADABIYOTLAR

1. Ся Мэн, «Анализ времени вращения динамической вращающейся оболочки накопителя скрытой энергии (RLESE)», // *Developments in the Built Environment*, т. 19, октябрь 2024 г., doi: 10.1016/j.dibe.2024.100498.
2. В. Линь, Ся Яо, В. Чжао, И. Пу и С. Ван, «Пути к углеродной нейтральности в архитектурной среде: материалы с фазовым переходом», // 1 июня 2024 г., KeAi Publishing Communications Ltd. doi: 10.1016/j.greenca.2024.03.003.
3. Ф. Ван и др., «Характеристики фотоэлектрического теплового насоса с использованием геотермальной энергии и бака с водой с фазовым переходом», // *Energy Build*, т. 339, июль 2025 г., doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115758.
4. Х. Ф. Бельмонте, М. Диас-Эрас и Х. А. Альмендрос-Ибаньес, «Упрощенный метод оценки эксергии резервуаров для хранения тепловой энергии: сравнительная характеристика резервуаров, содержащих материал с изменяемым фазовым состоянием и воду», // *J Energy Storage*, т. 68, сентябрь 2023 г., doi: 10.1016/j.est.2023.107863.
5. В. К. Джаббар, А. К. Альшара и А. С. Аллави, «Экспериментальное исследование ребристых резервуаров для хранения солнечной тепловой энергии, заполненных различными материалами (ПКМ, гравий и вода)», // *Results in Engineering*, т. 26 июня 2025 г., doi: 10.1016/j.rineng.2025.105041.
6. Джон А. Даффи, Уильям А. Бекман, «Солнечная инженерия тепловых процессов». 2006
7. Q. Sun, H. Wang, K. Dong, T. Lv и Z. Kang, «Экспериментальное исследование тепловых характеристик нового физически разделённого резервуара для хранения охлаждённой воды», // *J Energy Storage*, т. 40, август 2021 г., doi: 10.1016/j.est.2021.102628.
8. Н. İ. Yamaç и А. Коса, «Анализ характеристик оконных систем с водяным потоком и резервуаром для хранения тепловой энергии с учётом фазового перехода материала в осенний сезон», // *Journal of Building Engineering*, т. 70, июль 2023 г., doi: 10.1016/j.jobe.2023.106281.
9. Н. Бьянко, М. Калиано, А. Франьито, М. Иасиелло, Г. М. Мауро и Л. Монджибелло, «Термический анализ модулей на основе микрокапсулированных материалов с изменяемой фазой (МЕРСМ), интегрированных в коммерческий резервуар для хранения холодной тепловой энергии», // *Энергия*, т. 266, март 2023 г., doi: 10.1016/j.energy.2022.126479.
10. Б. Ламрани, А. Белкайд, Б. Э. Лебрухи, Дж. М. Холадади и Т. Эль Рафики, «Динамический тепловой анализ спаренной системы солнечных водонагревателей и накопителей тепла для сетей централизованного теплоснабжения с использованием солнечной энергии», // *J Energy Storage*, т. 61, май 2023 г., doi: 10.1016/j.est.2023.106793.
11. К. Майстер и И. Босoley-Моррисон, «Экспериментальные и модельные характеристики солнечной тепловой системы масштаба здания с сезонным накопителем воды», // *Solar Energy*, т. 222, стр. 145–159, июль 2021 г., doi: 10.1016/j.solener.2021.05.025.
12. J. Zhao, X. Zhai, X. Zhang, K. Wang и F. Chen, «Экспериментальное исследование динамических тепловых характеристик сезонного водонагревателя в системе солнечного отопления», // *Appl Therm Eng*, т. 280, декабрь 2025 г., doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128424.
13. Y. Luo и др., «Полуаналитическое моделирование крупногабаритного водонагревателя для сезонного теплоаккумулирования», // *Energy Build*, т. 278, январь 2023 г., doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112620.
14. Y. Ren, Z. Ren, G. Zou и Y. Xiao, «Экспериментальное исследование тепловых характеристик нового резервуара для хранения воды в форме перевернутой пирамиды, одновременно хранящего холод и тепло», // *International Journal of Thermal Sciences*, т. 219, январь 2026 г., doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.110234.
15. Y. Feng и др., «Проактивная стратегия эксплуатации резервуара для хранения тепловой энергии в промышленной многочиллерной системе, основанная на разнице расхода охлажденной воды между сторонами подачи и потребления», // *En-ergy*, т. 319, март 2025 г., doi: 10.1016/j.energy.2025.134752.
16. Б. Лю, В. Гао, И. Чжан, С. Дин, Ц. Ли и Цз. Ван, «Влияние начальной температуры воды в солнечном водонагревателе на температурную стратификацию при разряде», // *Renew Energy*, т. 212, стр. 994–1004, август 2023 г., doi: 10.1016/j.renene.2023.05.102.

17. Ч. Гуань, Х. Лу, Л. Чжан и Чж. Юй, «Регулирование выходной температуры в новой системе водонагрева с использованием твердого графита в качестве накопителя явной тепловой энергии: влияние водонагревателя», *Energy Reports*, т. 6, стр. 160–171, декабрь 2020 г., doi: 10.1016/j.egyр.2020.06.006.
18. Д. Фертахи, А. Самауали, Т. Боухал и А. Арид, «Повышение эффективности накопления тепловой энергии в вертикальном баке-аккумуляторе солнечного водонагревателя с принудительной циркуляцией с использованием материала с фазовым переходом», // *Appl Therm Eng*, т. 215, октябрь 2022 г., doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118972.
19. Цюй Ли, Сянь Хуан, И. Тай, В. Гао, Л. Вэньсянь и В. Лю, «Температурная стратификация в солнечном водонагревателе с кожуховым теплообменником», // *Renew Energy*, т. 173, стр. 1–11, август 2021 г., doi: 10.1016/j.renene.2021.03.105.
20. М. Нери, Э. Кьяваццо и Л. Монджибелло, «Численное моделирование и валидация коммерческих водонагревателей, интегрированных с накопителями на основе материалов с фазовым переходом», // *J Energy Storage*, т. 32, декабрь 2020 г., doi: 10.1016/j.est.2020.101938.
21. Ф. Л. К. Герхардт, Р. де В. Сальво, И. де Марчи Нето, Р. С. де Лима и Р. К. да Силва, «Вычислительное моделирование теплового «Бак для хранения энергии, соединённый с бытовым холодильником с водяным охлаждением», // *J Energy Storage*, т. 41, сентябрь 2021 г., doi: 10.1016/j.est.2021.102961.
22. Де ла Круз-Лоредо и др., «Экспериментальная проверка гибридной одномерной многоузловой модели бака-накопителя тепловой энергии с горячей водой», // *Appl Energy*, т. 332, февраль 2023 г., doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120556.
23. К. Кумар и С. Сингх, «Исследование температурной стратификации в вертикальном баке-накопителе горячей воды при нескольких переходных режимах работы», // *Energy Reports*, т. 7, стр. 7186–7199, ноябрь 2021 г., doi: 10.1016/j.egyр.2021.10.088.
24. Дж. Рендалл, А. Абу-Хейба, К. Глейзенкамп, К. Наваз, В. Ворек и А. Элатар, «Неразмерные числа конвекции, моделирующие термически стратифицированные резервуары для хранения: число Ричардсона и резервуары для горячей воды», // 1 октября 2021 г., Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2021.111471.
25. П. Д. ван Шалквик, Дж. П. Мейер, Дж. А. А. Энгельбрехт и М. Дж. Бойсен, «Численное моделирование сценариев термической стратификации в горизонтальных электрических резервуарах для хранения горячей воды», // *Appl Therm Eng*, т. 258, январь 2025 г., doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124716.
26. Х. Фэн, Х. Ли, С. Хэ, Цз. Ци, К. Хань и М. Гао, «Численное моделирование характеристик температурной стратификации в термоклинном резервуаре для хранения воды с многоступенчатыми перфорированными перегородками», *Thermal Science and Engineering Progress*, т. 35, октябрь 2022 г., doi: 10.1016/j.tsep.2022.101473.
27. Алесбе, Х. А. Абдул Ваххаб и С. Альджабаир, «Исследование переходных процессов температурной стратификации в полномасштабном резервуаре для хранения охлажденной воды при оптимальных условиях сброса», // *J Energy Storage*, т. 65, август 2023 г., doi: 10.1016/j.est.2023.107236.
28. Б. Лю, В. Гао, Цюй Ли, Х. Чэнь, И. Чжан и С. Дин, «Количественная оценка температурной стратификации и её влияния на энергоэффективность солнечных водонагревателей», // *Энергия*, т. 326, июль 2025 г., doi: 10.1016/j.energy.2025.136243.
29. Рахман, Н. Фумо и А. Д. Смит, «Упрощённое моделирование теплоаккумулирующего бака для распределённых систем рекуперации тепла», // Конференция ASME 2015 Power and Energy Conversion, 2015. doi: 10.1115/ES2015-49170.
30. Ю. Карлина, Ю. Йердеш, А. Толеуханов, Ю. Беляев, Х. С. Ван и О. Ботелла, «Численное моделирование тепловых характеристик резервуаров для хранения горячей воды с внешними и внутренними теплообменниками», // *Energies (Базель)*, т. 17, № 22, ноябрь 2024 г., doi: 10.3390/en17225623.
31. Л. Нэш, А. Бадитела и Н. Джейн, «Динамическое моделирование резервуара для хранения явной тепловой энергии с погружным змеевиковым теплообменником в трех режимах работы», // *Appl Energy*, т. 195, стр. 877–889, 2017 г., doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.092.
32. К. М. Пауэлл и Т. Ф. Эдгар, «Модель адаптивной сетки для динамического моделирования термоклинных систем хранения тепловой энергии», // *Energy Convers Manag*, т. 76, стр. 865–873, 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.043.



REFERENCES

1. X. Meng, "Analysis on rotation timing of dynamic Rotating latent-energy-storage envelope (RLESE)," // *Developments in the Built Environment*, vol. 19, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.dibe.2024.100498.
2. W. Lin, X. Yao, W. Zhao, Y. Pu, and S. Wang, "Pathways to carbon neutrality in the built environment: Phase change materials," // Jun. 01, 2024, *KeAi Publishing Communications Ltd.* doi: 10.1016/j.greenca.2024.03.003.
3. F. Wang *et al.*, "Performance of photovoltaic thermal–ground source heat pump with a phase change water tank," // *Energy Build*, vol. 339, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115758.
4. J. F. Belmonte, M. Díaz-Heras, and J. A. Almendros-Ibáñez, "A simplified method for exergy assessment of thermal energy storage tanks: Comparative performance of tanks containing a phase-change material and water," // *J Energy Storage*, vol. 68, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107863.
5. W. K. Jabbar, A. K. Alshara, and A. S. Allawy, "Experimental study of solar thermal energy storage finned tanks filled with different storage materials (PCM, gravel, and water)," // *Results in Engineering*, vol. 26, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105041.
6. John A. Duffie, William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2006
7. Q. Sun, H. Wang, K. Dong, T. Lv, and Z. Kang, "Experimental study on the thermal performance of a novel physically separated chilled water storage tank," // *J Energy Storage*, vol. 40, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102628.
8. H. İ. Yamaç and A. Koca, "Performance analysis of water flow window systems with thermal energy storage tank includes phase change material in autumn season," // *Journal of Building Engineering*, vol. 70, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106281.
9. N. Bianco, M. Caliano, A. Fragnito, M. Iasiello, G. M. Mauro, and L. Mongibello, "Thermal analysis of micro-encapsulated phase change material (MEPCM)-based units integrated into a commercial water tank for cold thermal energy storage," // *Energy*, vol. 266, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126479.
10. B. Lamrani, A. Belcaid, B. E. Lebrouhi, J. M. Khodadadi, and T. El Rhafiki, "Dynamic thermal analysis of a coupled solar water heaters-thermal storage tank for solar powered district heating networks," // *J Energy Storage*, vol. 61, May 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.106793.
11. C. Meister and I. Beausoleil-Morrison, "Experimental and modelled performance of a building-scale solar thermal system with seasonal storage water tank," // *Solar Energy*, vol. 222, pp. 145–159, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.05.025.
12. J. Zhao, X. Zhai, X. Zhang, K. Wang, and F. Chen, "Experimental study on dynamic thermal performance of seasonal hot water storage tank in a solar heating system," // *Appl Therm Eng*, vol. 280, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128424.
13. Y. Luo *et al.*, "Semi-analytical modeling of large-scale water tank for seasonal thermal storage applications," // *Energy Build*, vol. 278, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112620.
14. Y. Ren, Z. Ren, G. Zou, and Y. Xiao, "Experimental investigation on the thermal performance of a novel inverted pyramid-shaped simultaneous cold and heat storage water tank," // *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 219, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.110234.
15. Y. Feng *et al.*, "Proactive operational strategy of thermal energy storage tank in an industrial multi-chiller system based on chilled water flow difference between supply and demand sides," // *Energy*, vol. 319, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.134752.
16. B. Liu, W. Gao, Y. Zhang, X. Ding, Q. Li, and J. Wang, "Effect of initial temperature of water in a solar hot water storage tank on the thermal stratification under the discharging mode," // *Renew Energy*, vol. 212, pp. 994–1004, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.102.
17. C. Guan, H. Lu, L. Zhang, and Z. Yu, "Regulation of the output temperature in a novel water heating system using solid graphite as sensible heat thermal energy storage medium: Effects of water tank," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 160–171, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.06.006.
18. S. ed D. Fertahi, A. Samaouali, T. Bouhal, and A. Arid, "Thermal energy storage enhancement of a forced circulation solar water heater's vertical tank unit using phase change material," // *Appl Therm Eng*, vol. 215, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118972.
19. Q. Li, X. Huang, Y. Tai, W. Gao, L. Wenxian, and W. Liu, "Thermal stratification in a solar hot water storage tank with mantle heat exchanger," // *Renew Energy*, vol. 173, pp. 1–11, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.105.
20. M. Neri, E. Chiavazzo, and L. Mongibello, "Numerical simulation and validation of commercial hot water tanks integrated with phase change material-based storage units," // *J Energy Storage*, vol. 32, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101938.
21. F. L. C. Gerhardt, R. de V. Salvo, I. de Marchi Neto, R. S. de Lima, and R. C. da Silva, "Computational modeling of a thermal energy storage tank coupled to a water-cooled household refrigerator," // *J Energy Storage*, vol. 41, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102961.

22. De la Cruz-Loredo *et al.*, “Experimental validation of a hybrid 1-D multi-node model of a hot water thermal energy storage tank,” // *Appl Energy*, vol. 332, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120556.
23. K. Kumar and S. Singh, “Investigating thermal stratification in a vertical hot water storage tank under multiple transient operations,” // *Energy Reports*, vol. 7, pp. 7186–7199, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.10.088.
24. J. Rendall, A. Abu-Heiba, K. Gluesenkamp, K. Nawaz, W. Worek, and A. Elatar, “Nondimensional convection numbers modeling thermally stratified storage tanks: Richardson’s number and hot-water tanks,” // Oct. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2021.111471.
25. P. D. van Schalkwyk, J. P. Meyer, J. A. A. Engelbrecht, and M. J. Booysen, “Numerical modeling of thermal stratification scenarios in horizontal electric hot water storage tanks,” // *Appl Therm Eng*, vol. 258, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124716.
26. H. Feng, H. Li, S. He, J. Qi, K. Han, and M. Gao, “Numerical simulation on thermal stratification performance in thermocline water storage tank with multi-stage middle perforated obstacles,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 35, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.tsep.2022.101473.
27. Alesbe, H. A. Abdul Wahhab, and S. Aljabair, “Transient study of thermal stratification of full-scale chilled water storage tank during optimum discharge condition,” // *J Energy Storage*, vol. 65, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107236.
28. B. Liu, W. Gao, Q. Li, H. Chen, Y. Zhang, and X. Ding, “Quantification of thermal stratification and its impact on energy efficiency in solar hot water storage tanks,” // *Energy*, vol. 326, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136243.
29. Rahman, N. Fumo, and A. D. Smith, “Simplified modeling of thermal storage tank for distributed energy heat recovery applications,” // *ASME 2015 Power and Energy Conversion conference*, 2015. doi: 10.1115/ES2015-49170.
30. Y. Karlina, Y. Yerdesh, A. Toleukhanov, Y. Belyayev, H. S. Wang, and O. Botella, “Numerical Simulation Study of Thermal Performance in Hot Water Storage Tanks with External and Internal Heat Exchangers,” // *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.3390/en17225623.
31. L. Nash, A. Badithela, and N. Jain, “Dynamic modeling of a sensible thermal energy storage tank with an immersed coil heat exchanger under three operation modes,” // *Appl Energy*, vol. 195, pp. 877–889, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.092.
32. K. M. Powell and T. F. Edgar, “An adaptive-grid model for dynamic simulation of thermocline thermal energy storage systems,” // *Energy Convers Manag*, vol. 76, pp. 865–873, 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.043.