

УДК 551.34:697.1

DOI 10.17513/use.38435

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБОГРЕВА ПОМЕЩЕНИЙ ТЕПЛОТОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ

Кузьмин Г.П., Куваев В.А.

ФГБУН Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск, e-mail: eametlaeva@mpi.ysn.ru

Исследования посвящены актуальной проблеме поиска альтернативных источников энергии для отопления помещений. Одним из таких легкодоступных источников является теплота фазовых переходов воды. В работе обобщены результаты длительных экспериментальных исследований теплового взаимодействия опытного помещения, целью которых была разработка методики определения параметров водяного обогревательного устройства. В статье приведены условия испытания опытного объекта: показатели климата площадки проведения экспериментов, размеры и теплофизические характеристики материалов ограждающих конструкций помещения, параметры обогревательного устройства и количества воды. Изложена методика определения основного количества воды, теплота кристаллизации которой компенсирует потери тепла из помещения в окружающую среду. Приведена эмпирическая зависимость вспомогательного количества воды, обеспечивающего необходимую площадь передачи теплоты кристаллизации воды через образующуюся толщу льда в обогреваемое помещение. Предложена усовершенствованная конструкция водяного обогревательного устройства, форма, размеры, количество которого обеспечивают заданный температурный режим помещения и устойчивость действию давления образующегося льда. Длительными испытаниями опытного объекта установлена возможность практического использования теплоты фазовых переходов воды, являющейся возобновляемым источником энергии, для обогрева и даже отопления некоторых видов помещений на большей части территории России. Необходимое количество воды для обогрева помещений до высоких отрицательных температур, близких к 0 °C, зависит от климатических условий, размеров и термического сопротивления ограждающих конструкций и режима эксплуатации помещения.

Ключевые слова: помещение, теплота, потери, вода, кристаллизация, энергия, фазовый переход

Работа выполнена за счет средств федерального бюджета в рамках проекта «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов», № 122011800076-2.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF A DEVICE FOR HEATING ROOMS WITH THE HEAT OF CRYSTALLIZATION OF WATER

Kuzmin G.P., Kuvaev V.A.

Permafrost Institute. P.I. Melnikov Institute of Permafrost Science of the Siberian branch
of Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: eametlaeva@mpi.ysn.ru

The research is devoted to the urgent problem of searching for alternative energy sources for space heating. One of such easily accessible sources is the heat of phase transitions of water. The paper summarizes the results of long-term experimental studies of thermal interaction of an experimental room, the purpose of which was to develop a method for determining the parameters of a water heating device. The article presents the conditions for testing the experimental object: climate indicators of the experimental site, the dimensions and thermophysical characteristics of the materials of the enclosing structures of the room, the parameters of the heating device and the amount of water. A method for determining the main amount of water, the heat of crystallization of which compensates for heat loss from the room to the environment is presented. An empirical dependence of the auxiliary amount of water is given, providing the necessary area of transfer of the heat of crystallization of water through the forming thickness of ice into the heated room. An improved design of a water heating device is proposed, the shape, dimensions, and amount of which provide a given temperature regime of the room and resistance to the action of the pressure of the forming ice. Long-term tests of the pilot facility have established the possibility of practical use of the heat of phase transitions of water, which is a renewable energy source for heating and even heating of some types of premises in most of Russia. The required amount of water for heating premises to high negative temperatures, close to 0°C, depends on climatic conditions, the size and thermal resistance of enclosing structures and the operating mode of the premises.

Keywords: room, heat, losses, water, crystallization, energy, phase transition

The work was carried out at the expense of the federal budget within the framework of the project “Sustainability of natural and technical systems in the cryolithozone and development of technologies for the use of cryogenic resources”, No. 122011800076-2.

Введение

Значительные затраты на отопление жилых и производственных помещений в северных районах страны и вредное воз-

действие на окружающую среду основных источников тепла требуют обоснования и разработки способов использования экономически эффективных и экологически

безопасных возобновляемых источников тепловой энергии. Одним из таких источников энергии являются фазовые переходы воды. По этой теме опубликовано большое количество работ [1–3 и др.]. В ряде публикаций отражены особенности процесса кристаллизации воды и использования выделяемой энергии [4–6]. Технология использования теплоты фазовых переходов воды для решения различных задач удовлетворяет требованиям экологической безопасности [7, с. 19; 8, с. 173].

Ранее проведенными исследованиями [9–11] была показана возможность практического использования теплоты, выделяемой при кристаллизации воды, для обогрева помещений. Количество скрытой теплоты, выделяемой при кристаллизации воды, зависит от площади и интенсивности отвода тепла.

Основными положительными свойствами воды как источника тепла являются:

- возобновляемость тепловой энергии, обусловленной сезонными колебаниями температуры атмосферного воздуха;
- низкая стоимость получаемой тепловой энергии вследствие небольших капитальных и эксплуатационных затрат;
- полное использование выделяемой водой тепловой энергии для обогрева помещений;
- возможность применения технологии обогрева помещений в зимнее время повсеместно, включая малоосвоенные территории;
- экологическая безопасность.

К недостаткам способа обогрева помещений теплотой кристаллизации воды относятся:

- относительно низкая удельная теплота фазового перехода воды (335000 кДж/м^3), вследствие этого обогревательное устройство занимает значительную площадь обогреваемого помещения;
- возможность обогрева помещений теплотой кристаллизации воды только до температуры ниже 0°C ;
- значительное расширение воды при кристаллизации, приводящее к необходимости

использовать обогревательные устройства определенной формы, изготовленные из прочного материала.

Существует ряд видов помещений, в которых допускается высокая отрицательная температура, а при подключении теплового насоса можно получать необходимую положительную температуру в помещении.

В работе рассматривается технология получения в помещении в зимнее время высоких отрицательных температур.

Цель исследования – разработка методики расчета параметров обогревательного устройства помещений, основанного на фазовых переходах воды.

Задачи исследования:

- определение суммарного количества потерь тепла из помещения в окружающую среду в период отопительного сезона;
- определение количества воды, теплота кристаллизации которой равна суммарным потерям тепла из помещения;
- проведение испытаний опытного помещения в режимах «Зарядка» и «Разрядка» водяного обогревательного устройства;
- обработка результатов испытаний и определение вспомогательного количества воды в обогревательном устройстве;
- усовершенствование обогревательного устройства.

Материалы и методы исследования

Опытный объект, представляющий собой гараж, обогреваемый теплотой кристаллизации воды, построен в г. Якутске в 2018 г.

Потери тепла из помещения в окружающую среду определяли расчетным путем [12, с. 31; 13, с. 24; 14]. Испытания опытного объекта были проведены при различных среднезимних температурах наружного воздуха и разных количествах воды в обогревательных устройствах, названных водяными аккумуляторами тепла (ВАТ), в течение 2019–2025 гг. Зимние температуры наружного воздуха в разные годы до начала и в период испытания опытного объекта колебались в значительных пределах (табл. 1).

Таблица 1

Средние зимние температуры наружного воздуха в г. Якутске, $^\circ\text{C}$

По СП 131.133330.2020	Измеренные						
	2018– 2019 г.	2019– 2020 г.	2020– 2021 г.	2021– 2022 г.	2022– 2023 г.	2023– 2024 г.	2024– 2025 г.
-24,6	-20,7	-20,7	-23,8	-21,8	-23,4	-22,2	-20,6

Источник: составлено авторами на основе [15] и на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Размеры помещения и характеристики элементов ограждающих конструкций

b	1	h	δ_c	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6
м									
9,0	12,0	3,5	0,35	0,30	0,001	0,008	0,20	0,10	10,0

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	t_2	t_4	v_1
Вт/(м·К)						°С		м/с
0,043	0,16	0,038	1,55	0,043	2,0	-2	-3	0,2

S_n	S_c	$S_{пол}$	$V_{пом}$	$V_{воз}$	n_a
м ²			м ³		шт.
93,8	111,7	93,8	267,3	213,8	1

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Параметры водяных аккумуляторов

n , шт.	b_a , м	h_a , м	l_a , м	$tg\beta$	λ_a , Вт/(м·К)
8	1,5	1,8	22,0	0,014	1,72

Примечание: β – угол наклона боковых стен аккумулятора; l_a – суммарная длина аккумуляторов.
 Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.



Рис. 1. Металлические резервуары – водяные аккумуляторы тепла (ВАТ)
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Среднезимние температуры наружного воздуха во время испытания опытного объекта оказались несколько выше температуры, рекомендуемой справочным пособием [15, с. 3], а колебания их влияют на потери тепла и количество воды для отопления.

В табл. 2 приведены размеры опытного помещения и параметры ограждающих конструкций, в которой индексы 1–3 относятся к элементам перекрытия и стен помещения, а индексы 4–6 – к элементам пола.

В табл. 3 представлены характеристики охлаждающего устройства.

Количество воды в аккумуляторах тепла для отопления помещений V подразделяется по выполняемой функции на основное V_{oc} и вспомогательное $V_{вс}$. [14]:

$$V = V_{oc} + V_{вс}, \quad (1)$$

Основное количество воды в процессе кристаллизации в течение отопительного сезона выделяет тепло, которое должно быть равно суммарным потерям тепла из помещения в окружающую среду Q [14], и определяется по формуле

$$V_{oc} = Q / Q_{\phi}, \quad (2)$$

где Q_{ϕ} – объемная теплота кристаллизации воды.

Водяные обогревательные устройства помещений были изготовлены из стальных листов толщиной 3 мм. В опытном помещении (рис. 1) было установлено 8 водяных аккумуляторов трапециевидального поперечного сечения с небольшим углом наклона сторон ($tg\beta = 0,03$), длиной от 1,5 до 3,5 м, общей длиной 22 м, шириной по нижнему основанию 1,5 м, по верхнему – 1,6 м, высотой 1,8 м.

В процессе кристаллизации воды ВАТ большой длины сильно деформируются. В одном аккумуляторе произошел разрыв шва. Поэтому целесообразно изготавливать одинаковые небольшие по размерам аккумуляторы с большим углом наклона боковых стенок. На рис. 2 показан вид сбоку рекомендуемого квадратного в плане аккумулятора.

Объем аккумулятора выражается следующей формулой

$$V_a = \frac{h_a}{3} (b_{a1}^2 + b_{a1}b_{a2} + b_{a2}^2), \quad (3)$$

где h_a – высота аккумулятора; b_{a2} – размер по верхнему основанию.

Объем аккумулятора на основании того, что объем воды при кристаллизации увеличивается примерно на 10 %, представляется зависимостью

$$V_a = 1,1V_b, \quad (4)$$

Объем воды в аккумуляторе определяется формулой

$$V_b = \frac{h_b}{3} (b_{b1}^2 + b_{b1}b_{b2} + b_{b2}^2), \quad (5)$$

где b_{b1} – размер аккумулятора на уровне поверхности воды; h_b – высота воды в аккумуляторе;

b_{a1} – размеры стороны по нижнему основанию;

Наклон стенок аккумулятора выражается зависимостью

$$tg\beta = \frac{b_{ab} - b_{a1}}{2h_b}, \quad (6)$$

$$tg\beta = \frac{b_{a2} - b_{a1}}{2h_a}. \quad (7)$$

Размеры b_{ab} и h_b , а также параметры аккумулятора b_{a2} и h_a определяются по формулам (1)–(5).

Площадь теплообменной поверхности заполненного водой аккумулятора определяется по формуле

$$S_{ab} = b_{a1}^2 + b_{ab}^2 + 4 \frac{(b_{a1} + b_{ab})}{2} \frac{h_b}{\cos\beta}. \quad (8)$$

Необходимое количество аккумуляторов, устанавливаемых в помещении, определяется общим количеством воды для отопления помещения и объемом воды одного аккумулятора:

$$m = V / V_b. \quad (9)$$

Из формул (5) и (6) находим общую площадь теплообменной поверхности всех аккумуляторов предлагаемой конструкции:

$$S_a = m(b_{a1}^2 + b_{ab}^2 + 4 \frac{(b_{a1} + b_{ab})}{2} \frac{h_b}{\cos\beta}). \quad (10)$$

В экспериментах общая площадь аккумуляторов равна

$$S_{a3} = 2b_a l_a + V \left(\frac{2}{b_a} + \frac{n}{l_a} \right), \quad (11)$$

где $n = 16$.

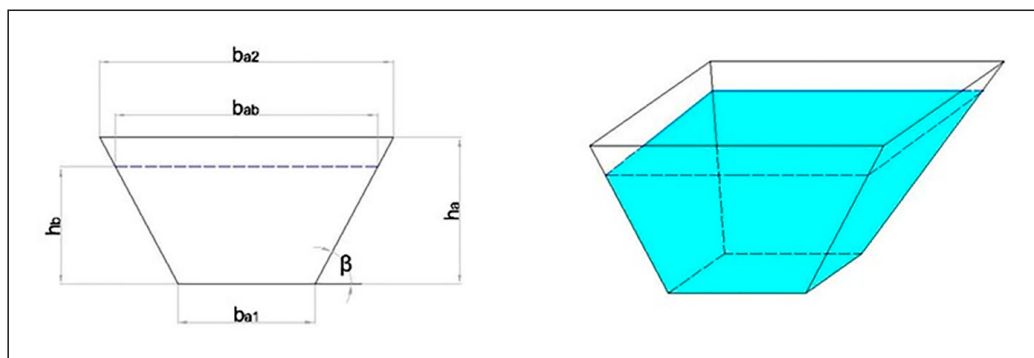


Рис. 2. Вид рекомендуемого аккумулятора

Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

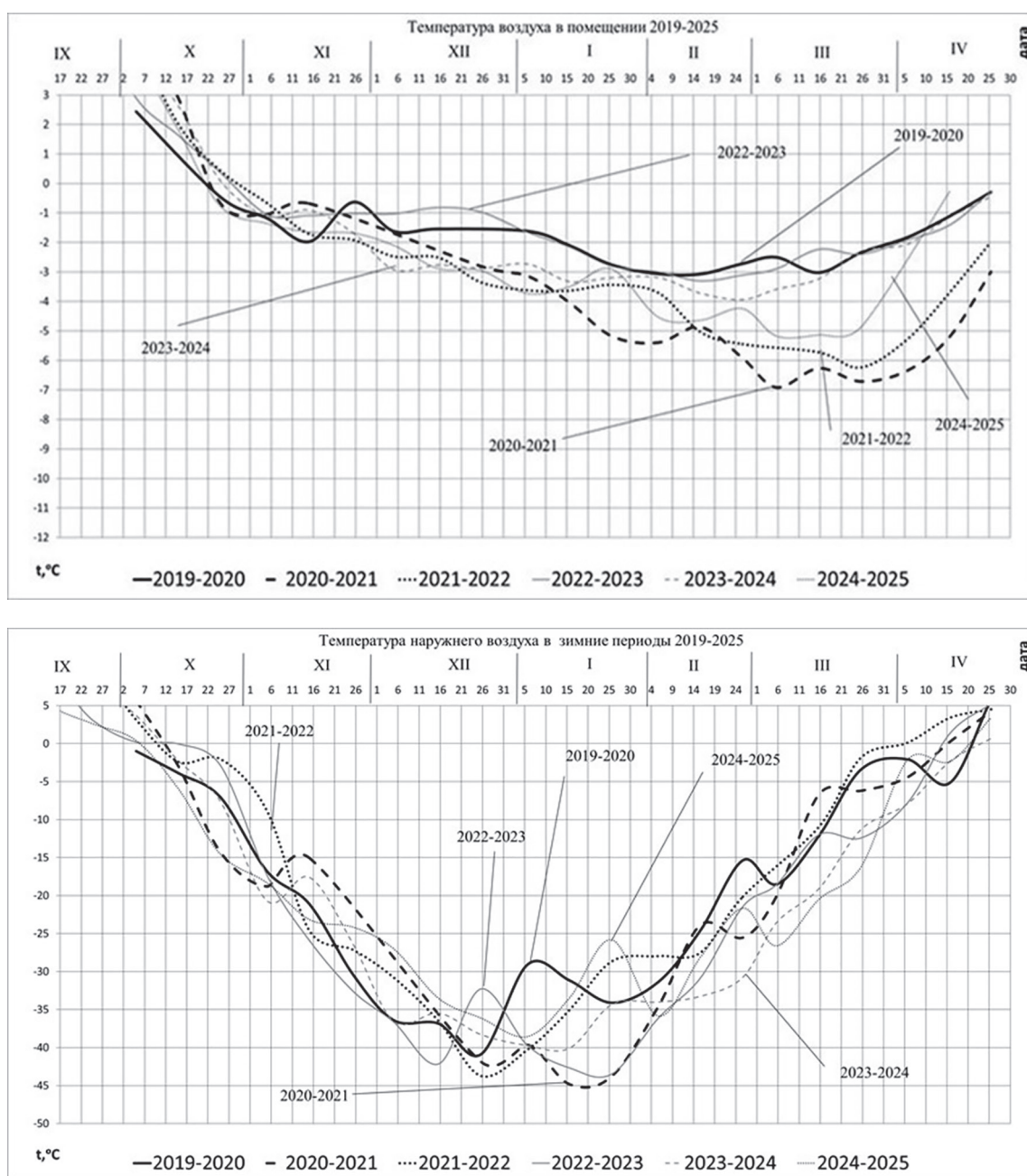


Рис. 3. Динамика температур воздуха внутри и снаружи помещения в зимние периоды при различных значениях суммарного объема воды в аккумуляторах ($48,5\text{--}56,6\text{ м}^3$)
 Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 представлены графики среднесуточных температур воздуха внутри и снаружи помещения. В климатических условиях г. Якутска температуры воздуха снаружи и внутри помещения понижаются с затухающей скоростью примерно до начала ноября, затем остаются практически на одном уровне – температура наружного возду-

ха – до середины февраля, а температура в помещении – до середины марта и в дальнейшем повышаются, причем температура в помещении достигает 0°C несколько позже. Такой характер изменения температуры помещения во второй половине зимы объясняется уменьшением площади поверхности льда, по которой происходит передача тепла из зоны кристаллизации воды в окружающий лед, увеличением толщины и терми-

ческого сопротивления льда. Температура в помещении зависит от количества воды и изменяется в соответствии с изменением температуры наружного воздуха.

Наибольшие потери тепла происходят через надземные части ограждающих конструкций помещения. Значительные потери тепла связаны также с выездом и заездом транспортных средств. Относительно высокие потери тепла через открытые ворота, очевидно, будут уменьшаться при увеличе-

нии размеров помещения в связи с уменьшением степени воздухообмена. Потери тепла могут быть несколько уменьшены повышением термического сопротивления ограждающих конструкций помещения, а также устройством тамбура у ворот.

В табл. 4 приведены расчетные количества потерь тепла из помещения в разные годы с различным количеством воды в аккумуляторах с учетом потерь ее на испарение и сублимации льда.

Таблица 4

Результаты определения количества воды в экспериментах

Годы	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Q	$V, \text{м}^3$	$V_{\text{ос}}, \text{м}^3$	$V_{\text{вс}}, \text{м}^3$
2019–2020	-20,7	-1,9	12961264	49,5	38,7	10,8
2020–2021	-23,8	-3,6	13513221	51,2	40,3	10,9
2021–2022	-21,27	-2,6	12672526	48,5	37,8	10,7
2022–2023	-23,4	-1,3	15287886	56,6	45,6	11,0
2023–2024	-22,2	-1,8	14046826	52,5	41,9	10,6
2024–2025	-20,6	-2,5	12395734	47,5	37,0	10,5

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

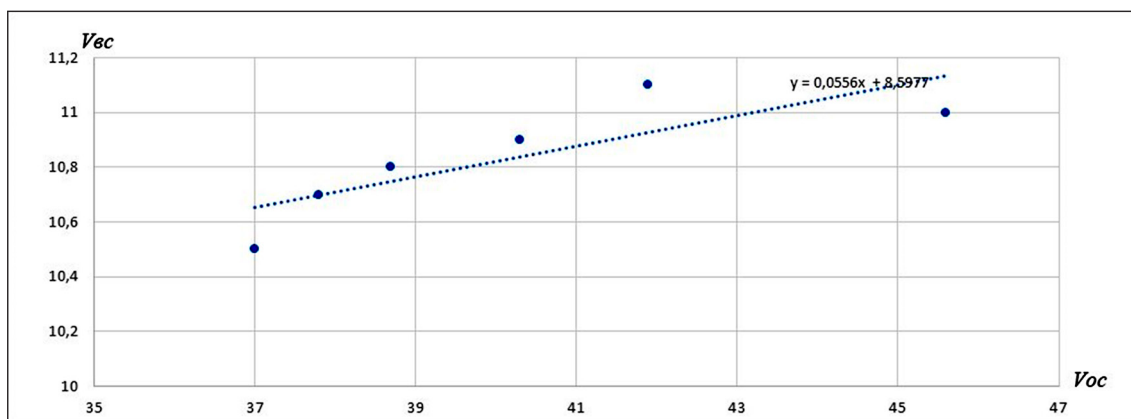


Рис. 4. График зависимости вспомогательного количества воды от основного количества ее в аккумуляторах. Точками показаны экспериментальные значения $V_{\text{ос}}$
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Таблица 5

Расчетные параметры экспериментального аккумулятора

$V, \text{м}^3$	$h_a = V / (b_a l_a), \text{м}$	$S_{\text{аэ}}$ по формуле (8)
49,5	1,50	168,0
51,2	1,55	171,5
48,5	1,47	165,9
56,6	1,73	183,7
52,5	1,59	174,2
47,5	1,44	163,9

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

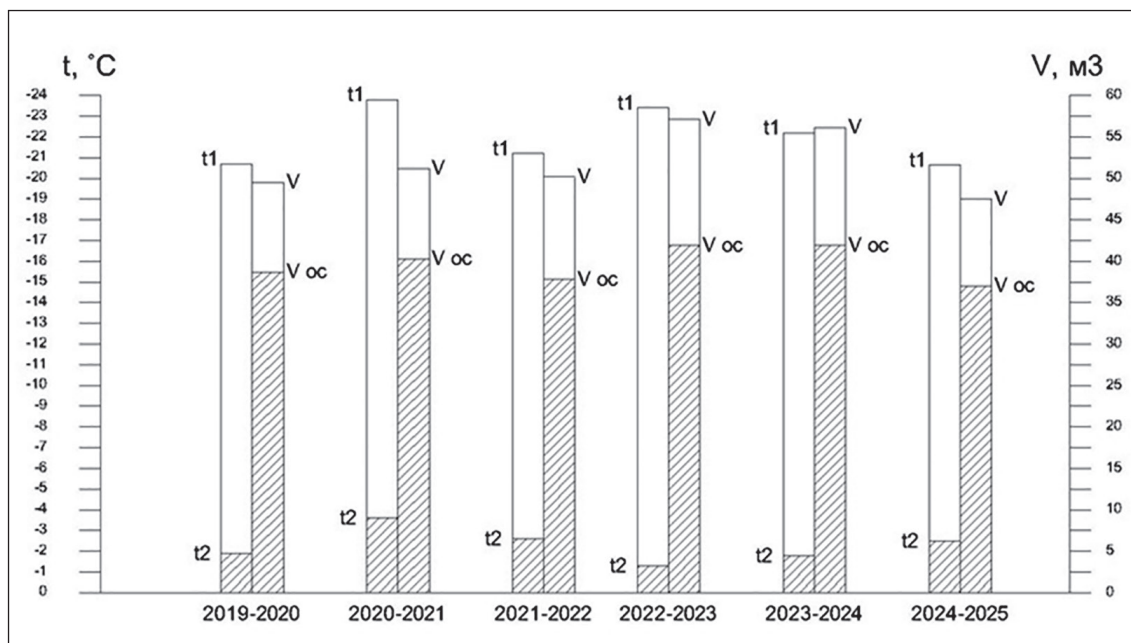


Рис. 5. Диаграмма температур наружного воздуха и внутри помещения и объемы воды в аккумуляторах в различные годы испытания опытного объекта
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Таблица 6

Расчетные параметры предлагаемого аккумулятора по формулам (3)–(10) при заданных значениях V , $V_b = 6,0 \text{ м}^3$, $b_{a1} = 1,5$, и угол $\beta = 15^\circ\text{C}$

$V, \text{ м}^3$	$b_{ав}$	h_b	b_{a2}	h_a	m	S_a
49,5	2,40	1,60	2,41	1,70	8,3	172,2
51,2					8,5	178,1
48,5					8,1	168,7
56,6					9,4	196,9
52,5					8,8	182,7
47,5					7,9	165,3

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Количества V_{oc} и V_{bc} зависят от климатических условий, размеров и термического сопротивления ограждающих конструкций помещения (табл. 4).

Зависимость V_{bc} от V_{oc} графически показана на рис. 4, которая выражается линейным уравнением

$$V_{bc} = 8,60 + 0,06V_{oc}. \quad (12)$$

На рис. 5 представлена диаграмма температур наружного воздуха и внутри помещения и объемы воды в аккумуляторах в различные годы испытания опытного объекта.

В табл. 5 приведены расчетные значения параметров экспериментальных аккумуля-

торов при заданных значениях V , $b_a = 1,5 \text{ м}$ и $l_a = 22,0 \text{ м}$.

В табл. 6 приведены расчетные параметры предлагаемого аккумулятора при заданных значениях $V_b = 6,0 \text{ м}^3$; $b_{a1} = 1,5 \text{ м}$ и $\beta = 15^\circ\text{C}$.

На рис. 6 представлены графики зависимости теплообменной поверхности экспериментального и предлагаемого аккумуляторов от объема воды.

Из рис. 6 видно, что при одинаковых объемах воды суммарная теплообменная поверхность аккумулятора предлагаемой конструкции больше, чем у экспериментального аккумулятора.

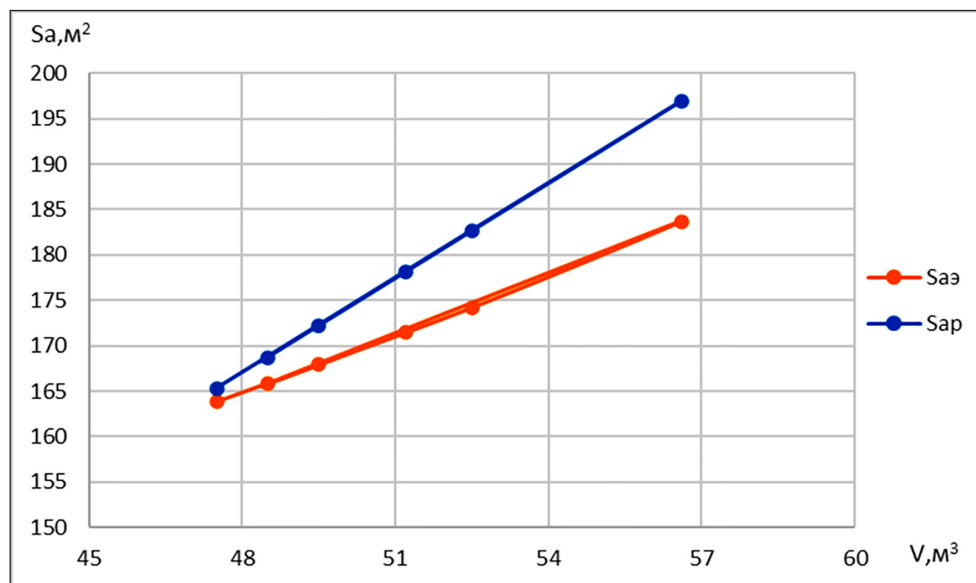


Рис. 6. Графики зависимости теплообменной поверхности экспериментального и предлагаемого аккумуляторов от объема воды
Источник: составлено авторами по результатам данного исследования

Выводы

По итогам исследования сделаны следующие выводы:

- относительно широкий диапазон колебаний средних значений температуры наружного воздуха приводит к различным потерям тепла и, соответственно, к разным количествам воды для отопления помещения;
- характер изменения температуры в помещении в зимнее время соответствует изменениям температуры наружного воздуха, повторяя кратковременные ее колебания;
- температура в помещении понижается примерно до начала ноября, затем она с небольшими колебаниями остается постоянной до середины апреля и в дальнейшем повышается с меньшей скоростью, чем наружная температура вследствие уменьшения площади теплообмена на границе вода – лед и увеличения термического сопротивления льда;
- основное количество воды в аккумуляторах, определяемое расчетным путем по суммарной величине потерь тепла из помещения в окружающую среду, зависит от климатических условий площадки расположения объекта, размеров и термического сопротивления ограждающих конструкций заданной температуры помещения;
- вспомогательное количество воды в аккумуляторах, от которого зависит площадь кристаллизации воды, термическое

сопротивление льда и соответственно температура в помещении, линейно возрастает с увеличением основного количества воды;

- для уменьшения давления и снижения деформации аккумуляторов, возникающих при кристаллизации воды с увеличением ее объема, целесообразно изготавливать их небольшими по размерам и с большим наклоном стенок;

- аккумуляторы заполняются водой с учетом увеличения ее объема при кристаллизации примерно на 10 %.

Длительными испытаниями опытного объекта установлена возможность практического использования теплоты фазовых переходов воды, являющейся возобновляемым источником энергии для обогрева и даже отопления некоторых видов помещений на большей части территории России. Необходимое количество воды для обогрева помещений до высоких отрицательных температур, близких к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, зависит от климатических условий, размеров и термического сопротивления ограждающих конструкций и режима эксплуатации помещения.

Список литературы

1. Горбенко О.Н., Рожкова А.А. Использование воды как источника энергии // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5–2. С. 39–39. URL: <https://top-technologies.ru/article/view?id=33905> (дата обращения: 16.08.2025).
2. Шишелова Т.И., Толстой М.Ю. Современное состояние науки о воде. Проблемы и перспективы // Научное обозрение. 2016. № 4. С. 61–80. URL: <https://abstract.>

science-review.ru/ru/article/view?id=1799 (дата обращения: 16.08.2025).

3. Бараненко А.В., Кузнецов П.А., Захарова В.Ю., Цой А.П. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 990–1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000.

4. Каржавин В.К. Особенности условий кристаллизации жидкой фазы // Физическая и аналитическая химия природных и техногенных систем: сборник трудов Всероссийской конференции с международным участием (Дубна, 14–15 апреля 2021 г.) / Под общ. ред. П.П. Гладышева. Дубна: Университет «Дубна», 2021. С. 79–81. EDN: ZZGNCJ.

5. Стеценко В.Ю. Особенности кристаллизации воды // Литье и металлургия. 2024. № 3. С. 95–97. DOI: 10.21122/1683-6065-2024-3-95-97.

6. Новиков А.А., Ершова И.Г. Разработка экспериментальной установки на фазовом переходе вода – лед // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 2 (39). С. 21–26. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-2-21-26.

7. Мозулевский А.А. Экологическая безопасность и методы ее обеспечения: учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2020. 230 с. ISBN 978-586813-521-7.

8. Экологическая и техносферная безопасность. Часть I – Теоретические основы экологической и техносферной безопасности: учебное пособие / М.В. Архипов, В.В. Кульнев, М.Б. Носырев, Л.П. Парфёнова, В.А. Почечун, А.И. Семячков, К.А. Семячков, А.А. Фоминых, Л.Б. Хорошавин; под ред. А.И. Семячкова. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 177 с. URL: <http://www.geol.vsu.ru/ecology/Science/Tutorials/2017/EcoTehnoSafety1.pdf> (дата обращения: 25.07.2025).

9. Кузьмин Г.П. Новые технологии использования теплоты фазовых переходов воды // Международный журнал приклад-

ных и фундаментальных исследований. 2017. № 5–2. С. 217–221. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=11574> (дата обращения: 16.07.2025).

10. Кузьмин Г.П. Устройство для поддержания околонулевой температуры в закрытых помещениях. Патент № 2617579 Российская Федерация, МПК, заявитель и патентообладатель Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (RU). Опубл. 25.04.2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://mpi.ysn.ru/en/publications/inventions> (дата обращения: 24.07.2025).

11. Кузьмин Г.П., Куваев В.А. Вода как аккумулятор солнечной энергии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 9. С. 80–84. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12855> (дата обращения: 16.07.2025). DOI: 10.17513/mjpf.12855.

12. Малявина Е.Г. Теплотери зданий: справочное пособие. М.: «АВОК – ПРЕСС». 2007. 144 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elima.ru/books/?id=1566> (дата обращения: 18.07.2025).

13. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд. 3-е. «Энергия», 1975. 488 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12320/33429.pdf> (дата обращения: 24.07.2025).

14. Кузьмин Г.П., Куваев В.А. Результаты испытания устройства для управления температурным режимом помещений теплотой фазового перехода воды // Успехи современного естествознания. 2022. № 8. С. 127–132. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37878> (дата обращения: 16.08.2025). DOI: 10.17513/use.37878.

15. СП 131.13330.2012. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция взамен СНиП 23-01-99*. Минстрой России. М., 2020. 146 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095546> (дата обращения: 22.07.2025).