

УДК 624.139

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ПОМЕЩЕНИЙ ТЕПЛОТОЙ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВОДЫ

Кузьмин Г.П., Куваев В.А.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: gpkuzmin@mpi.ysn.ru

Для управления температурным режимом помещений в зимнее время расходуется огромное количество теплоты, получаемой из различных источников энергии, в том числе из возобновляемых. Производство тепловой энергии в большинстве случаев сопровождается тем или иным нарушением состояния окружающей среды. Одним из перспективных возобновляемых источников энергии, в наибольшей степени удовлетворяющих экологическим требованиям, является теплота фазового перехода воды. Аккумуляция в воде при таянии льда относительно большого количества энергии в теплое время года и выделение ее при замерзании воды в холодное время года создают возможность использования теплоты фазовых переходов воды для обогрева помещений в холодное время года до высоких отрицательных температур, близких к 0 °С. В статье указаны основные уникальные свойства воды, от которых зависят эффективность и технология ее использования. Приведена технология накопления и использования тепла для обогрева помещений в холодное время года. Приведены приближенные зависимости потерь тепла из опытного помещения и параметров обогревателя, основанного на использовании теплоты фазовых переходов воды. Представлены результаты расчетов параметров обогревателя опытного помещения, испытания которого были проведены в суровых климатических условиях г. Якутска. Приведены основные результаты испытания опытного объекта, подтвердившие практическую возможность и целесообразность использования теплоты фазовых переходов воды для обогрева ряда видов производственных помещений. Установлена необходимость некоторого уточнения расчетных параметров водяного аккумулятора тепла.

Ключевые слова: вода, лед, температура, теплота фазового перехода, аккумулятор, помещение, теплопередача, объем, площадь

TEST RESULTS OF A DEVICE FOR CONTROLLING THE TEMPERATURE REGIME OF PREMISES BY THE HEAT OF THE PHASE TRANSITION OF WATER

Kuzmin G.P., Kuvayev V.A.

*Permafrost Institute. P.I. Melnikov Institute of Permafrost Science, Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: gpkuzmin@mpi.ysn.ru*

In order to control the temperature regime of rooms in winter, a huge amount of heat is consumed from various, including renewable energy sources. The production of thermal energy in most cases is accompanied by some kind of environmental disturbance. One of the most promising renewable sources of energy that best meets environmental requirements is the phase transition heat of water. Accumulation of a relatively large amount of energy in water during ice melting in the warm season and its release during freezing of water in the cold season make it possible to use the heat of phase transition of water for heating the premises in the cold season to high negative temperatures close to 00 C. The article specifies the main unique properties of water, which determine the efficiency and technology of its use. The technology of accumulation and use of heat for space heating during the cold season is given. Approximate dependences of the heat loss from the experimental room and the parameters of the heater based on the use of the heat of phase transitions of water are given. The results of calculations of the heater parameters of an experimental room, the tests of which were carried out in the harsh climatic conditions of Yakutsk are presented. The main results of the testing of the experimental object, which confirmed the practical possibility and expediency of using the heat of phase transitions of water for heating a number of types of industrial premises are presented. The necessity of some specification of calculations of parameters of the water heat accumulator is established.

Keywords: water, ice, temperature, heat of phase transition, accumulator, room, heat transfer, volume, area

Большая часть территории России характеризуется холодным климатом, где в зимнее время на отопление жилых и производственных помещений затрачивается огромное количество тепловой энергии, получаемой из различных источников с различной степенью влияния на окружающую среду [1, 2]. В качестве возобновляемого источника энергии, оказывающего минимальное воздействие на окружающую среду, в работе рассматривается возможность использования теплоты фазового перехода воды [3–5]. Технология обогрева поме-

щений в зимнее время теплотой фазового перехода воды до высоких отрицательных температур состоит в аккумуляции водной теплоты, затрачиваемой на плавление льда в летнее время под действием солнечной радиации, и использовании теплоты, выделяемой в процессе замерзания воды в зимнее время [6].

Цель работы – показать практическую возможность и эффективность использования теплоты фазового перехода воды для обогрева на большей части территории России, включая арктические ее районы.

Материалы и методы исследования

1. Свойства воды как возобновляемого источника тепла

Вода является уникальным веществом, изменяющим свои свойства в зависимости от температуры и давления [7]. При изменениях температуры и давления вода может находиться, как известно, в твердом, жидком и газообразном состояниях. При земных давлениях и температурах она, в отличие от других веществ, может одновременно находиться во всех трех состояниях. В данной работе рассматривается возможность использования для обогрева помещений теплоты, выделяемой при кристаллизации воды. Поэтому кратко приведем изменения свойств воды при переходах ее из твердого состояния в жидкое и обратно. При этих фазовых переходах воды выделяется или поглощается одинаковое относительно большое количество теплоты, равное 335 кДж/кг, что значительно больше теплоты фазовых переходов многих других веществ. Так, например, теплота плавления парафина в 2,3 раза, стали в 4,0 раза меньше теплоты плавления льда, а температура плавления их равна соответственно 54 и 1300–1500 °С [8]. Эти данные показывают возможность практического использования теплоты, выделяемой водой при замерзании. Существенными особенностями воды являются скачкообразные изменения теплопроводности и плотности ее при переходах лед – вода – лед и особый характер изменения плотности при изменении тем-

пературы. Коэффициент теплопроводности чистого льда равен около 2,22, а воды – около 0,57 Вт/(м К). Плотность льда составляет около 0,9 г/см³, воды при 0 °С – 1 г/см³, что приводит к плавучести льда. Расширение воды при замерзании в сосудах вызывает деформации и разрушения их. При повышении температуры от 0 до 4 °С плотность воды возрастает, а при дальнейшем повышении температуры снижается. Поэтому конвективное перемешивание воды имеет сложный характер. Эти особенности воды должны учитываться при разработке технологии аккумулирования и использования теплоты фазовых переходов воды.

2. Расчетные зависимости определения параметров помещения и водяных аккумуляторов тепла

Потери тепла из помещения за холодный период года зависят от климатических условий места расположения объекта, размеров и термического сопротивления стен ограждающих конструкций и заданной температуры помещения, а также потерь на технологические процессы и определяются суммой потерь через перекрытие $Q_{\text{п}}$, стены $Q_{\text{с}}$, полы $Q_{\text{пол}}$ помещения, открытые ворота при воздухообмене с наружным воздухом $Q_{\text{в}}$ и на технологические процессы $Q_{\text{т}}$:

$$Q = Q_{\text{п}} + Q_{\text{с}} + Q_{\text{пол}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{т}}. \quad (1)$$

Составляющие суммарных потерь тепла из опытного помещения (гаража) приближенно определим по следующим зависимостям [9]:

$$Q_{\text{п}} = kk_{\text{п}} S_{\text{п}} (t_2 - t_1) (\tau - \tau_0); \quad (2)$$

$$Q_{\text{с}} = kk_{\text{с}} S_{\text{с}} (t_2 - t_1) (\tau - \tau_0); \quad (3)$$

$$Q_{\text{пол}} = kk_{\text{пол}} S_{\text{пол}} [(t_2 - t_4) (\tau - \tau_0)]; \quad (4)$$

$$Q_{\text{в}} = 2n_a n_{\text{рд}} c_{\text{в}} \rho_{\text{в}} V_{\text{в}} (t_2 - t_1) + kk_a S_a (t_3 - t_1) \tau_0; \quad (5)$$

$$Q_{\text{т}} = n_a n_{\text{рд}} [c_k m_k (t_2 - t_1) + c_d m_d (t_2 - t_d) + c_c m_c (t_2 - t_c)], \quad (6)$$

где k , $k_{\text{п}}$, $k_{\text{с}}$, $k_{\text{пол}}$ и k_a – коэффициенты перевода метрической системы в систему СИ и теплопередачи через ограждающие конструкции помещения и ледяную стенку водяных аккумуляторов тепла; n_a и $n_{\text{рд}}$ – количество автомобилей в гараже и зимних рабочих дней; $S_{\text{п}}$, $S_{\text{с}}$, $S_{\text{пол}}$ и S_a – площади теплообменной поверхности перекрытия, стен, полов помещения и водяных аккумуляторов тепла, определяемые вследствие большой толщины стен, в отличие от рекомендаций [10],

по внутренним размерам; t_1 , t_2 , t_3 и t_4 – средние за холодный период года температуры наружного воздуха, помещения, воды в аккумуляторе и грунта в основании помещения; τ и τ_0 – продолжительность периодов с отрицательной температурой наружного воздуха и открытого положения ворот помещения; $c_{\text{в}}$, c_k , c_d и c_c – удельные теплоемкости воздуха и материалов корпуса, двигателя и салона автомобиля в кДж/(кг К); $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха в помещении; $V_{\text{в}}$ – объем воз-

духа в помещении; m_k , m_d и m_c – средняя масса корпуса, двигателя и салона автомобиля; t_d и t_c – температуры двигателя и салона в момент въезда автомобиля в гараж.

Входящие в (2)–(6) параметры приближенно можно выразить зависимостями:

– коэффициенты теплопередачи через плоские поверхности ограждающих конструкций помещения [8] с учетом скорости движения воздуха:

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{a_{i1}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{2i}}}, \quad (7)$$

где $a_{i1} = 5,6 + 3,9v_{i1}^2$, $Bm / (M^2K)$ – коэффициент теплоотдачи на i -й внутренней поверхности стенки; v_{i1} – скорость движения воздуха на i -й внутренней поверхности стенки в м/с; $a_{2i} = 5,6 + 3,9v_{2i}^2$, $Bm / (M^2K)$ – коэффициент теплоотдачи на i -й наружной поверхности стенки; v_{2i} – скорость движения воздуха на i -й наружной поверхности стенки в м/с; δ_i и λ_i – толщина и коэффициент теплопроводности i -го слоя – перекрытия и стены помещения 1–3, полов 4–6;

окончательное выражение потерь тепла из помещения,

$$Q = [Q_{\text{п}} + Q_c + Q_{\text{пол}} + Q_{\text{т}} + 2n_a n_{\text{рд}} c_v \rho_v V_v (t_2 - t_1)] \left[1 + \frac{(t_3 - t_1) \tau_0}{(t_3 - t_2)(\tau - \tau_0)} \right], \quad (12)$$

и зависимость расчетной площади цилиндрического аккумулятора,

$$S_a = \frac{Q}{kk_a [(t_3 - t_2)(\tau - \tau_0) + (t_3 - t_1)\tau_0]}. \quad (13)$$

Необходимое количество воды в аккумуляторах для обогрева помещения в течение всего холодного периода года определяется по формуле

$$V = Q / Q_{\phi}, \quad (14)$$

где Q_{ϕ} – объемная теплота фазового перехода воды.

Коэффициент теплопередачи через боковую поверхность приведенного цилиндрического аккумулятора определяется зависимостью [8]:

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{a_1} \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2\lambda_i} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{a_2}}, \quad (15)$$

где a_1 – коэффициент теплоотдачи поверхности льда в воде; $a_2 = 5,6 + 3,9v_2^2$ – ко-

личество рабочих дней в период отрицательных температур наружного воздуха:

$$n_{\text{рд}} = \frac{\tau - 24n_{\text{пр}}}{24 \cdot 7} \cdot 5, \quad (8)$$

где $n_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в период отрицательных температур наружного воздуха;

– продолжительность открытого состояния ворот в период отрицательных температур наружного воздуха:

$$\tau_0 = 2n_a n_{\text{рд}} \tau_v, \quad (9)$$

где τ_v – продолжительность разового открытия ворот;

– объем воздуха в помещении, принимаемый без учета объема воды в аккумуляторах равным:

$$V_v = (b - 2\delta_c)(l - 2\delta_c)(h - \delta_c - \delta_n). \quad (10)$$

Суммарное количество притока тепла из аккумулятора в помещение в холодный период года:

$$Q_a = k k_a S_a [(t_3 - t_2)(\tau - \tau_0) + (t_3 - t_1)\tau_0]. \quad (11)$$

Из равенств (1) и (11) находим:

коэффициент теплоотдачи на поверхности аккумулятора в помещении; v_2 – скорость движения воздуха вдоль наружной поверхности аккумулятора; λ_i – коэффициент теплопроводности льда; $d_1 = \sqrt{\frac{2V}{\pi l_a}}$ – сред-

ний за зиму диаметр льда в аккумуляторе;

$d_2 = \sqrt{\frac{4V}{\pi l_a}}$ – диаметр аккумулятора.

Результаты исследования и их обсуждение

В опытном помещении (гараже) установлены водяные аккумуляторы тепла прямоугольной формы в количестве 8 шт. Расчет притока тепла в помещение выполнен по приведенным зависимостям цилиндрического аккумулятора (11), (13) и (15).

Ширина прямоугольного аккумулятора должна быть

$$b_a > 2\zeta. \quad (16)$$

В формуле (16) приближенно

$$\zeta = \sqrt{\frac{2\lambda_i(-t_2)\tau}{Q_\phi}}$$
 – максимальная толщина

льда на стенках аккумулятора в конце зимнего периода.

Толщина слоя воды в прямоугольном аккумуляторе определяется зависимостью

$$h_a = \frac{Q}{b_a l_a}. \quad (17)$$

В табл. 1–3 приведены величины для расчетов потерь тепла из опытного помещения и параметров водяных аккумуляторов тепла.

Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что при принятой одинаковой удельной передаче тепла через перекрытие и стены одноэтажных помещений потери тепла через стены максимальны

вследствие большей их площади. Небольшие потери тепла в основание помещения обусловлены незначительным перепадом температур воздуха в помещении и грунта в основании. Относительно высокие потери тепла через открытые ворота при выезде и въезде автомобилей, очевидно, будут уменьшаться при увеличении размеров помещения в связи с уменьшением степени воздухообмена. При въезде в гараж легковых автомобилей приток тепла от нагретых двигателя и салона превышает потери тепла на нагрев охлажденного кузова автомобилей.

Таблица 1

Расчетные климатические данные на опытной площадке в г. Якутске [7]

τ , ч	t , °C	v_2 , м/с
5016	-22,1	1,2

Таблица 2

Параметры опытного помещения

М									
b	l	h	δ_c	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6
9,0	12,0	3,5	0,35	0,30	0,001	0,008	0,20	0,10	10,0
Вт/(м·К)						°C		м/с	
λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	t_2	t_4	v_2	
0,043	0,16	0,038	1,55	0,043	2,0	-2	-3	1,2	

Таблица 3

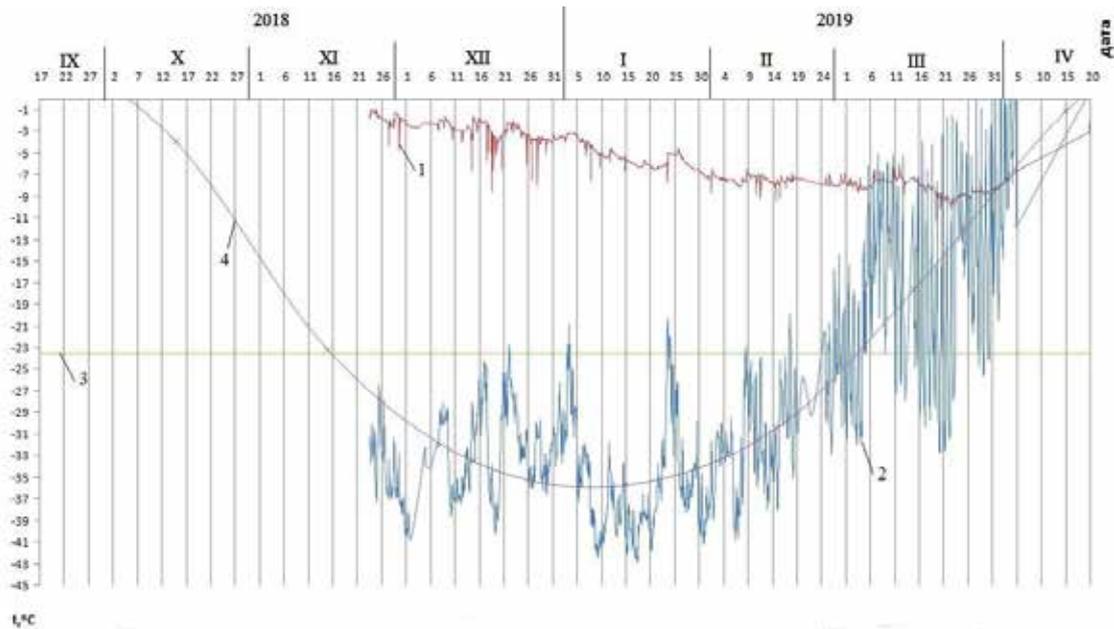
Заданные параметры водяных аккумуляторов

V , м ³	n , шт	b_a	l_a	λ_a	v_1
44,5	8	1,5	22,0	2,32	0,2

Таблица 4

Результаты расчетов параметров и величин потерь тепла из помещения и параметров водяных аккумуляторов тепла

k	$k_n = k_c$	$k_{пол}$	k_a	n_a	$n_{пл}$	τ_0	V_B
Вт/(м ² К)				шт	сут	ч	м ³
3,61	0,134	0,134	3,37	2	142	28,4	263
Q_n	Q_c	Q_m	$Q = Q_a$	$Q_{пол}$	Q_B	S_n	S_c
кДж						м ³	
4552203	5436045	-102229	14896774	226532	3901566	94	112
$S_{пол}$	S_0	V	h_a				
м ²		м ³	м				
94	125,4	44,5	1,35				



Графики изменения температуры воздуха в период испытания опытного объекта в 2018–2019 гг.
 1 – температура воздуха в помещении; 2 – температура наружного воздуха;
 3 – средняя многолетняя температура наружного воздуха;
 4 – измеренная температура наружного воздуха в период испытания объекта

На рисунке представлены графики температуры наружного воздуха и опытного гаража в зимние месяцы в г. Якутске. Результаты эксперимента подтверждают практическую возможность использования теплоты фазовых переходов воды для обогрева помещений даже в очень суровых климатических условиях.

Из рисунка следует некоторое несоответствие расчетной и экспериментальной температур воздуха помещения. В начале зимы экспериментальные температуры соответствовали расчетной температуре, равной $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. В период существенного падения температуры наружного воздуха в январе произошло понижение температуры помещения в течение месяца примерно до $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, и она оставалась на этом уровне, несмотря на повышение температуры наружного воздуха, почти до конца эксперимента. Это можно объяснить уменьшением площади поверхности теплообмена льда с водой в аккумуляторах, что в расчетах не учитывалось.

Заключение

Проведенные испытания опытного помещения в субарктической зоне показали практическую возможность широ-

кого применения технологии использования теплоты фазовых переходов воды для управления температурным режимом различных видов производственных помещений. Понижение температуры воздуха в помещении во второй половине зимы, когда температура наружного воздуха повышается, вызвано уменьшением теплообменной поверхности льда в аккумуляторах и соответствующим снижением теплопередачи в помещение. Поддержание температуры помещения в течение всего холодного периода года в пределах заданного значения может быть достигнуто некоторым увеличением количества воды в аккумуляторах.

Список литературы

1. Шишелова Т.И., Толстой М.Ю. Современное состояние науки о воде. Проблемы и перспективы // Научное обозрение. Реферативный журнал. 2016. № 4. С. 61–80.
2. Юмаев Н.Р. Экологические аспекты применения возобновляемых источников энергии // Современные тенденции технических наук: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2018 г.). Казань: Молодой ученый, 2018. С. 16–21.
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. Кузьмин Г.П. Новые технологии использования теплоты фазовых переходов воды // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 5–2. С. 217–221.

5. Кузьмин Г.П., Куваев В.А. Вода как аккумулятор солнечной энергии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 9. С. 80–84.

6. Патент № 2617579 Российская Федерация. МПК «Устройство для поддержания околонулевой температуры в закрытых помещениях» Кузьмин Г.П., заявитель и патен-

тообладатель Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (RU). Опубл. 25.04.2017.

7. Сафаров М.Г. Про воду. Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2014. 152 с.

8. Ехнович А.С. Краткий справочник по физике. 2-е изд., перераб. и доп. М.: «Высшая школа», 1976. 288 с.

9. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. 3-е изд. М.: Энергия, 1975. 488 с.

10. Малявина Е.Г. Теплопотери зданий: справочное пособие. М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. 144 с.