ВОДА КАК АККУМУЛЯТОР СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ**Кузьмин Г.П., Куваев В.А.***Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: kuzmin mpi.ysn.ru*

Отмечается возможность использования солнечной тепловой энергии на основе фазовых переходов воды для отопления некоторых видов помещений в холодное время года. Использование воды в качестве аккумулятора солнечного тепла является одним из безопасных для окружающей среды альтернативных возобновляемых источников получения энергии. Этот способ использования солнечного тепла пригоден на большей части территории России. Применение технологии ограничено лишь в некоторых районах Крайнего Севера из-за малой эффективности вследствие низких температур наружного воздуха и малой продолжительности летнего периода. Технология испытана в зимнее время на физической модели и опытном помещении в климатических условиях г. Якутска, характеризующихся низкими температурами и большой продолжительностью зимнего периода. Приводится описание устройства опытного помещения и водяного аккумулятора солнечного тепла. Опытное помещение представляет стояночный гараж. Водяной аккумулятор состоит из металлических резервуаров с водой, при замерзании которой в зимнее время выделяется тепло, а при плавлении льда в летнее время происходит аккумулярование солнечного тепла. Приводятся зависимости для определения расчетных параметров и потерь тепла через ограждающие конструкции и полы помещения, через открывающиеся ворота для въезда и выезда автомобиля, на нагрев охлажденного автомобиля. Излагаются результаты испытания в зимнее время опытного гаража, оборудованного водяным аккумулятором солнечного тепла.

Ключевые слова: вода, теплота фазовых переходов, солнечное тепло, аккумулярование, теплопередача, потери тепла

WATER AS A SOLAR ENERGY BATTERY**Kuzmin G.P., Kuvaev V.A.***Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru*

The possibility of using solar thermal energy based on phase transitions of water for heating certain types of premises in the cold season is noted. Using water as an accumulator of solar heat is one of the environmentally friendly alternative renewable sources of energy. This method of using solar heat is suitable in most of the territory of Russia. The use of technology is limited only in the Far North due to low efficiency due to low outside temperatures and the short duration of the summer period. The technology was tested in winter on a physical model and experimental room in the climatic conditions of Yakutsk, characterized by low temperatures and a long winter period. The description of the device of the experimental room and the solar water heat accumulator is given. The experimental building is a parking garage. A water battery consists of metal tanks with water, which freezes during the winter when it freezes, and when the ice melts in the summer, solar heat accumulates. Dependencies are given for determining the design parameters and heat loss through the building envelopes and floors of the room, through the opening gates for leaving and entering the car, for heating a cooled car. The winter test results of an experimental garage equipped with a solar water heat accumulator are presented.

Keywords: water, heat of phase transitions, solar heat, storage, heat transfer, heat loss

В настоящее время опубликовано большое количество работ, посвященных различным вопросам аккумулярования и использования тепловой энергии. В работе [1] изложены основные принципы аккумулярования тепла и использования теплоаккумулирующих материалов. Существуют различные вещества, при кристаллизации которых при определенной постоянной температуре выделяется значительное количество так называемой скрытой теплоты фазовых переходов [2]. Эти вещества могут применяться для аккумулярования солнечного тепла. Большое количество тепла выделяется при кристаллизации воды, которая как аккумулятор тепловой солнечной энергии может найти применение для отопления закрытых помещений до высоких отрицательных температур, близких к 0°C [3]. При аккумуляровании скрытой теплоты для систем отопления подбирают вещества,

плавление и кристаллизация которых происходит при температурах $30\text{--}50^{\circ}\text{C}$. К таким веществам относятся хлорид кальция ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и сульфат натрия (глауберова соль). Количество теплоты фазового перехода хлорида кальция приближается к количеству теплоты фазового перехода воды. При использовании указанных веществ для аккумулярования скрытой теплоты фазовых переходов требуется принимать меры безопасности. Кроме того, для некоторых видов сооружений высокие отрицательные температуры являются оптимальными или допускаются в качестве рабочих. К таким сооружениям можно отнести ледовые катки, стояночные гаражи, ангары, прогулочные и спортивные помещения при детских учреждениях, круглогодичные хранилища некоторых видов овощей, сезонные хранилища овощей, хранилища ряда веществ и материалов и т.д. Применение в таких со-

оружениях водяных аккумуляторов солнечной энергии (ВАСЭ) является эффективным и безопасным способом использования возобновляемой энергии Солнца. Непрерывная циклическая работа ВАСЭ возможна в таких климатических условиях, при которых в летнее время обеспечивается полное таяние образовавшегося в аккумуляторах льда. На территории России применение водяных аккумуляторов солнечного тепла ограничено только в некоторых районах на Крайнем Севере из-за низких значений положительных градусо-часов наружного воздуха, снижающих эффективность такого способа получения возобновляемой энергии.

Технология использования теплоты фазовых переходов воды для обогрева помещений испытана на физической модели и на опытном гараже в холодное время года в суровых климатических условиях Центральной Якутии в г. Якутске.

Цель исследований заключалась в оценке возможности практической реализации технологии использования солнечного тепла на основе фазовых переходов (ТФП) воды для управления температурным режимом закрытых помещений и получения данных для разработки методики теплотехнического расчета. При испытании водяных аккумуляторов солнечной энергии в качестве обогревательного устройства закрытых помещений необходимо последовательно решать задачи, связанные с разрядкой и зарядкой их. В статье дана характеристика климатических условий места проведения эксперимента, изложено описание устройства опытного помещения и водяного аккумулятора солнечной энергии, приведены зависимости для определения расчетных параметров и потерь тепла, представлены основные результаты испытания опытного помещения в режиме разрядки водяного аккумулятора в холодное время года.

Результаты первого этапа испытания водяного аккумулятора солнечной энергии в качестве обогревательного устройства показали реальную возможность применения предложенного экономически эффективно и безопасного для окружающей среды способа использования возобновляемой солнечной энергии.

Устройство и теплообмен опытного помещения с окружающей средой

Необходимое количество аккумулируемого тепла в ВАСЭ определяется потерями тепла из помещения в зимнее время, величины которых обусловлены климатическими условиями, размерами помещения, термическим сопротивлением ограждающих

конструкций и технологическими особенностями помещения.

Климатические условия г. Якутска за последние 5 лет характеризуются следующим [4]. Среднее значение температуры воздуха в зимнее время равно минус 22,0 °С, в летнее время 13,4 °С. Средняя продолжительность периодов с отрицательной и положительной температурами воздуха равны соответственно 4964 и 3796 ч. Средняя скорость ветра, от величины которой зависит теплообмен наружной поверхности ограждающих конструкций помещения с окружающим воздухом, равна в зимнее время 1,9, в летнее время 3,0 м/с. Низкие зимние температуры воздуха в течение длительного времени приводят к большим потерям тепла из помещения. В летнее время суммарный приток тепла в помещение ограничен вследствие невысоких температур воздуха и относительно небольшой продолжительности теплого периода. Однако в летнее время более высокая скорость ветра, чем зимой, способствует теплоотдаче воздуха к поверхности ограждающих конструкций помещения.

Опытное помещение представляет собой стояночный гараж шириной 9,0, длиной 12,0 и высотой 3,5 м и толщиной стены около 0,31 м. Общая площадь ограждающих конструкций помещения, соприкасающихся с наружным воздухом, составляет 255 м². Площадь пола равна 93,8 м². Гараж построен из металлического каркаса. Перекрытие и стены утеплены полистиролом толщиной 30 см и коэффициентом теплопроводности 0,452 Вт/м²К, пенофолом толщиной 8 мм и коэффициентом теплопроводности 0,383 Вт/м²К. Стены и кровля покрыты профилированным металлическим листом. Пол покрыт полистиролом толщиной 10 см и залит бетоном толщиной 20 см. Грунты основания представлены до глубины 0,3 м суглинками, ниже до исследованной глубины 10 м – мелкозернистыми песками. Среднегодовая температура грунтов равна минус 2,0 °С. Ворота шириной 3,0 и высотой 2,8 м изготовлены так же, как и стены. Внутри помещения установлены водяные аккумуляторы солнечной энергии, представляющие собой металлические резервуары с водой, изготовленные из листовой стали толщиной 3,0 мм. Для уменьшения давления льда на стенки резервуаров, возникающего вследствие увеличения объема воды при ее замерзании, они выполнены наклонными. Высота резервуаров равна 1,8 м, ширина их принята равной по низу 1,5 м, по верху 1,6 м. Суммарная длина восьми резервуаров равна 22,0 м. Резервуары заполнены водой объемом 44,3 м³ до высоты 1,3 м.

Общее количество потерь тепла из опытного объекта в холодное время года можно представить в виде суммы

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (1)$$

где Q_1 , Q_2 , Q_3 и Q_4 – потери тепла соответственно через ограждающие конструкции помещения в атмосферу; через пол помещения в грунты основания; через ворота при выезде и въезде автомобиля; на нагрев охлажденного автомобиля.

Расчеты потерь тепла из зданий в окружающую среду изложены в различных нормативных документах и статьях. Наиболее подробно они представлены в работе [5].

Потери тепла через ограждающие конструкции определяются по известной формуле теплопередачи через плоскую стенку

$$Q_1 = k_1 S_1 (t_2 - t_1) (\tau - \tau_0), \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент теплопередачи через многослойную плоскую стенку; S_1 – площадь наружной поверхности ограждающих конструкций помещения; t_1 – средняя за зиму температура внутри помещения; t_2 – средняя за зиму температура наружного воздуха; τ – продолжительность периода отрицательных температур наружного воздуха; τ_0 – суммарное за зиму время открытого состояния ворот помещения.

Коэффициент теплопередачи через ограждающую конструкцию помещения

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3)$$

где $\alpha_1 = 5,6 + 3,9v_1^2$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции; v_1 – средняя скорость движения воздуха вдоль внутренней поверхности ограждающей конструкции; $\alpha_2 = 5,6 + 3,9v_2^2$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции; v_2 – средняя за зиму скорость ветра; δ_i – толщина i -го слоя ограждающей конструкции; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя ограждающей конструкции.

Потери тепла через пол помещения приближенно можно оценить по формуле

$$Q_2 = S_2 (t_1 - t_{гр}) (\tau - \tau_0) / R, \quad (4)$$

где S_2 – площадь пола; R – среднее значение термического сопротивления пола.

$$Q_4 = [C_1 (G - g_d - g_c) (t_2 - t_1) + C_1 g_d (t_d - t_1) + C_2 g_c (t_c - t_1)] n_a, \quad (9)$$

где G , g_d и g_c – масса соответственно всего автомобиля, двигателя и салона; C_1 и C_2 – средняя удельная теплоемкость корпуса автомобиля и средняя удельная теплоемкость материалов салона; t_d и t_c – средняя за зиму температура нагретого двигателя и салона; n_a – число открываний ворот за зиму.

Для определения R площадь пола при отсутствии заглубления здания в грунт разбивается на 3 зоны [4]. Зона 1 представляет полосу шириной $b_1 = 2$ м, отмеренную от внутренней поверхности стены. Зона 2 шириной также $b_1 = 2$ м располагается за зоной 1. Зона 3 занимает всю оставшуюся часть площади пола.

Среднее значение сопротивления теплопередаче пола определяется по формуле

$$R = \frac{R_1 S_1 + R_2 S_2 + R_3 S_3}{S_1 + S_2 + S_3}, \quad (5)$$

где $R_1 = 4,3$; $R_2 = 8,6$; $R_3 = 14,0 \frac{\text{м}^2 \text{К}}{\text{Вт}}$, а площадь зон $S_1 = 2b_1[(l - 2b_c) + (b - 2b_c - 2b_1)]$; $S_2 = 2b_1[(l - 2b_c - 2b_1) + (b - 2b_c - 4b_1)]$; $S_3 = (l - 2b_c - 4b_1)(b - 2b_c - 4b_1)$, м^2 ; l – длина помещения; b – ширина помещения; b_c – толщина стены; $b_1 = 2$ м – ширина зон S_1 и S_2 .

Потери тепла через открытые ворота приближенно можно найти по формуле

$$Q_3 = (t_2 - t_b) \tau_0 (k_6 S_6 + m k_T S_T), \quad (6)$$

где $t_b = 0$ – температура воды в резервуарах; k_6 и k_T – коэффициенты теплопередачи через цилиндрическую и плоскую ледяные стенки; $S_6 = \pi d_2 l$ и $S_T = 2n\pi d_2^2 / 4$ – суммарные площади боковой и торцевой частей эквивалентных прямоугольным цилиндрических резервуаров в количестве n ; m – коэффициент учета теплопередачи через торцы резервуаров.

Коэффициенты теплопередачи определяются известными формулами

$$k_6 = \frac{1}{d_2 \left(\frac{1}{\alpha_b d_1} + \frac{1}{2\lambda_{л}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_1 d_2} \right)}, \quad (7)$$

$$k_T = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{d_2 - d_1}{2\lambda_{л}} + \frac{1}{\alpha_1}}, \quad (8)$$

где d_1 и d_2 – средние за зиму внутренний и внешний диаметры эквивалентного цилиндрического ледяного тела; α_b и α_1 – коэффициенты теплоотдачи от воды к цилиндрической внутренней поверхности льда и от внешней поверхности льда к воздуху помещения; $\lambda_{л}$ – коэффициент теплопроводности льда.

Потери тепла на нагрев охлажденного автомобиля [5]

$$Q_4 = [C_1 (G - g_d - g_c) (t_2 - t_1) + C_1 g_d (t_d - t_1) + C_2 g_c (t_c - t_1)] n_a, \quad (9)$$

где G , g_d и g_c – масса соответственно всего автомобиля, двигателя и салона; C_1 и C_2 – средняя удельная теплоемкость корпуса автомобиля и средняя удельная теплоемкость материалов салона; t_d и t_c – средняя за зиму температура нагретого двигателя и салона; n_a – число открываний ворот за зиму.

Температурные кривые в период эксперимента 2018–2019 гг: 1 – наружного воздуха, измеренные; 2 – наружного воздуха по данным [3]; 3 – воздуха в помещении; 4 – среднезимняя наружного воздуха

Необходимое количество воды определяется из равенства

$$Q = Q_{\phi} V, \quad (10)$$

где Q_{ϕ} – объемная теплота фазового перехода воды, равная $335,2 \cdot 10^3$ кДж/м³; V – общее количество воды в резервуарах.

Основные результаты испытания опытного помещения и их обсуждение

Проведено испытание опытного помещения в зимнее время, т.е. на этапе разрядки водяного аккумулятора тепловой солнечной энергии. Потери тепла из опытного гаража на этом этапе включают теплопередачу через стены и перекрытие в атмосферу, через пол в грунты основания, отток тепла через открывающиеся ворота для выезда и въезда автомобиля, затраты тепла на нагрев охлажденного автомобиля. Выхлопные газы при подогреве двигателя автомобиля отводились через шланг, пропущенный через отверстие в стене гаража. В процессе испытания объекта проводились наблюдения за температурой наружного воздуха, температурой воздуха в гараже и температурой грунтов его основания. Измерения температуры воздуха снаружи и внутри помещения проводились с интервалом 1 ч. Результаты этих измерений графически представлены на рисунке. Температура наружного воздуха 1 имеет минимум в середине января и характеризуется резкими колебаниями, особенно во второй половине зимы. Минимальная замеренная температура наружно-

го воздуха в период 2018–2019 гг. составила минус $42,0^{\circ}\text{C}$.

Кривая 2 среднемесячных температур наружного воздуха, построенная по данным [4], в основном соответствует измеренным значениям ее в период 2018–2019 гг. Температура воздуха в гараже в течение зимы постепенно понижалась почти линейно и в среднем составила минус $4,0^{\circ}\text{C}$. Такой характер изменения температуры в гараже, несмотря на повышение температуры наружного воздуха во второй половине зимы, вызван, очевидно, уменьшением величины площади теплообмена воды в резервуарах с поверхностью льда. Резкие колебания температуры наружного воздуха почти не оказывали влияния на температуру внутри гаража. На кривой температуры воздуха в помещении видны импульсные ее понижения, вызванные поступлением холодного воздуха в гараж при открывании ворот для выезда и въезда автомобиля. Следует отметить, что в некоторых случаях открывание ворот происходило во время отключенного состояния датчиков температуры воздуха в помещении и, вследствие этого, всплески температуры в это время не отражены на графике 3.

Результаты первого этапа испытаний опытного помещения показывают техническую возможность эффективного использования аккумулированной в воде тепловой солнечной энергии для отопления некоторых видов помещений в суровых климатических условиях. Выявлены некоторые

конструктивные недостатки в устройстве аккумуляторов тепла. Увеличение объема воды при ее замерзании вызвало повреждение некоторых резервуаров – вздутие дна, вырыв листового металла в местах сварных стяжных уголков к внутренним поверхностям боковых стенок резервуаров. Конструктивное выполнение резервуаров оказалось неудовлетворительным – недостаточная толщина стенок, небольшой угол наклона стенок резервуаров, недопустимое устройство стяжек внутри резервуаров.

Фактическое значение потерь тепла из опытного помещения, равное количеству теплоты фазового перехода залитой в аккумуляторы воды, составляет 14849360 кДж. Приведенные зависимости потерь тепла из помещения и результаты выполненных и предстоящих испытаний опытного помещения позволят разработать методику теплотехнического расчета закрытых помещений, оборудованных системой солнечного отопления.

Заключение

На основании проведенных исследований подготовлены основы для разработки методики теплотехнического расчета закрытых помещений, оборудованных водяным аккумулятором солнечного тепла

в качестве системы отопления до высоких отрицательных температур. Проведены результаты испытания опытного гаража, обогреваемого теплотой фазового перехода воды, в климатических условиях г. Якутска. Результаты испытания показали эффективность применения способа даже в очень суровых климатических условиях и необходимость решения технических задач обеспечения прочности резервуаров для воды.

Список литературы

1. Бабаев Б.Д. Принципы теплового аккумулярования и используемые теплоаккумулирующие материалы // ТВТ. 2014. Т. 52. Вып. 5. С. 760–776.
2. Бараненко А.В., Кузнецов Л.А., Захарова В.Ю., Цой А.П. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулярования тепловой энергии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 900–1000.
3. Кузьмин Г.П. Новые технологии использования теплоты фазовых переходов воды. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 5–2. С. 217–221.
4. Архив погоды в Якутске. Интернет-ресурсы. [Электронный ресурс]. URL: https://tp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%AF%D0%BA%D1%83%D1%82%D1%81%D0%BA%D0%B5 (дата обращения: 27.06.2019).
5. Малявина Е.Г. Теплотеплопотери здания: справочное пособие. 2011. 152 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://rucont.ru/efd/270994> (дата обращения: 27.06.2019).