

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.565.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-6-14



Оригинальная статья /Original article

Сравнительный анализ водо-ледных аккумуляторов холода

А.В. Бараненко, В.В. Тамаров, М.В. Короленко

Национальный исследовательский университет ИТМО,
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, Россия

Резюме. Цель. Применение аккумуляции холода в системах охлаждения повышает их эффективность, снижает мощность устанавливаемого оборудования, выравнивает нагрузки на электросети и обеспечивает экономический эффект. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа технических характеристик различных модификаций водо-ледных аккумуляторов холода. **Результат.** Проведен анализ технических характеристик льдоаккумуляторов трех типов: с намораживанием воды на теплообменной поверхности (тип 1), с замораживание воды в емкости (тип 2) и в контейнерах (тип 3). Разработаны рекомендации по их применению и определены перспективные направления научных исследований в этой области. Сопоставлены удельные параметры: объем, холодопроизводительность и металлоемкость. **Вывод.** Аппараты второго и третьего типов имеют ряд преимуществ перед аппаратами первого типа. Они компактнее, имеют меньшую в 1,5–3 раза металлоемкость. Эффективность льдоаккумуляторов всех трех типов по удельной холодопроизводительности примерно одинакова и находится в пределах 0,08–0,3 кВт/кВтч. Интерес представляют аккумуляторы третьего типа. Для их создания необходимо выполнить комплекс аналитических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: вещества с фазовым переходом, водный лед, льдоаккумулятор, аккумулирующая емкость, холодопроизводительность, удельная металлоемкость

Для цитирования: А.В. Бараненко, В.В. Тамаров, М.В. Короленко. Сравнительный анализ водо-ледных аккумуляторов холода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-6-14

Comparative analysis of water-ice cold storage devices

A.V. Baranenko, V.V. Tamarov, M.V. Korolenko

National Research University ITMO,
49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia

Abstract. Objective. The use of cold accumulation in cooling systems increases their efficiency, reduces the power of the installed equipment, equalizes the load on the electrical grid and ensures an economic effect. **Method.** The study is based on the methods of thermodynamic analysis of technical characteristics of various modifications of water-ice cold accumulators. **Result.** The analysis of technical characteristics of three types of ice accumulators was carried out: with water freezing on the heat-exchange surface (type 1), with water freezing in a tank (type 2) and in containers (type 3). Recommendations for their use were developed and promising areas of scientific research were determined. Specific parameters were compared: volume, cooling capacity and metal consumption. **Conclusion.** Devices of the second and third types have a number of advantages over devices of the first type: they are more compact, have a metal consumption 1.5–3 times lower. The efficiency of ice accumulators of all types in terms of specific cooling capacity is approximately the same and is within the range of 0.08–0.3 kW/kWh. Accumulators of the third type are of interest. To create them, it is necessary to carry out a set of analytical and experimental studies.

Keywords: phase change materials, water ice, ice thermal energy storage, storage capacity, cooling capacity, specific metal intensity

For citation: A.V. Baranenko, V.V. Tamarov, M.V. Korolenko. Comparative analysis of water-ice cold storage devices. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-6-14

Введение. Аккумулирование холода относится к технологиям, которые обеспечивают повышение эффективности систем холодоснабжения [1]. Наличие накопителей холода позволяет снимать пиковые нагрузки потребителей холода. Это дает возможность устанавливать холодильные машины меньшей мощности, работающие при этом в оптимальных режимах. Применение холодильных систем с аккумуляторами холода также выравнивает нагрузки на электросети и снижает расходы на электроэнергию, поскольку аккумуляторы заряжаются в периоды непиковых нагрузок электросетей и льготных тарифов [2]. Перспективным методом аккумулирования холода является использование веществ с фазовым переходом (ВФП), называемых также теплоаккумулирующими веществами.

Известно порядка 1800 ВФП, которые могут применяться в накопителях теплоты и холода [3,4]. Для холодильной техники температуры фазовых переходов жидкость - твердое тело - жидкость веществ должны быть отрицательными или близкими к 0 °С. ВФП с последним диапазоном температур приемлемы для систем охлаждения достаточно большого количества различных технологических процессов, а также систем кондиционирования воздуха (СКВ), которые являются крупными потребителями холода с переменными нагрузками [5]. Требования к свойствам теплоаккумулирующих веществ изложены в целом ряде публикаций. Одними из основополагающих их свойств являются химическая стабильность, постоянство температуры фазовых переходов, небольшие разности значений плотности в жидком и твердом состоянии, а также температур плавления и затвердевания. Относительно большие величины удельной теплоты плавления и плотности ВФП обеспечивают меньшие массы и объемы веществ при заданной емкости аккумуляторов. К веществам, представляющим большой интерес для использования в качестве теплоаккумулирующей среды с фазовым переходом, относится вода. Она доступна, химически стабильна, имеет большую величину фазового перехода при температуре 0 °С (333,4 кДж/кг). При замерзании объем водного льда увеличивается на 9 % по отношению к жидкости [6]. Температура теплоносителя на выходе из водо-ледных аккумуляторов холода, как правило, составляет 1–7 °С. Такой потенциал охлаждения широко востребован в пищевой, химической и других отраслях промышленности, а также в СКВ [7].

Система охлаждения с водным льдом в качестве аккумулялирующей среды обеспечивает минимизацию приведенных затрат [8]. По исследованиям авторов [9] использование льдоаккумулятора в системе кондиционирования воздуха (СКВ) привело к снижению потребления электроэнергии на 11,8 % и уменьшению расходов на нее на 32,7 %. Авторами [10] показано сокращение годового энергопотребления СКВ с аккумулированием холода водным льдом на 4,6 %.

Постановка задачи. Известны три варианта водо-ледных аккумуляторов холода:

1. Лед намораживается из потока воды на теплообменной поверхности, внутри которой кипит хладагент при отрицательной температуре или же циркулирует теплоноситель, рис.1 [11].
2. Вода замерзает во всем объеме емкости вследствие того, что внутри теплообменной поверхности циркулирует теплоноситель с температурой ниже 0 °С или же кипит хладагент, рис. 3 и рис. 4 [12,13].
3. Вода, как теплоаккумулирующее вещество с фазовым переходом, находится в контейнерах, размещаемых в емкости с циркулирующим теплоносителем [14,15].

Цель настоящей работы заключается в выполнении сравнительного анализа технических характеристик различных модификаций водо-ледных аккумуляторов холода;

в разработке на этой основе рекомендаций по их применению, а также в определении перспективных направлений научных исследований в этой области.

Методы исследования. Конструкции водо-ледных аккумуляторов холода и их технические характеристики. Аккумуляторы холода с намораживаем льда из потока воды на теплообменной поверхности испарителя являются самым распространенным типом водо-ледных аккумуляторов. В данных устройствах вода, помимо теплоаккумулирующего вещества с фазовым переходом, также является теплоносителем. Это обстоятельство является недостатком таких систем и не позволяет их использовать в целом ряде технологий, в которых применяются отличные от воды теплоносители. Аккумуляторы данного вида достаточно металлоемки, поскольку в них необходимо иметь развитую поверхность испарителя для намораживания льда, толщина которого в силу его высокого термического сопротивления, как правило не превышает 40 мм. При таянии льда (разрядке аккумулятора) теплоноситель (вода) может быть охлажден до 0,5–1 °С. Этот фактор обуславливает широкое применение этих устройств в технологиях отраслей промышленности, где требуется холод с таким потенциалом и в качестве теплоносителя может быть использована вода. Конструкция аккумуляторов холода данного типа представляет собой герметичную теплоизолированную емкость, заполненную циркулирующей водой, с расположенными в ней секциями испарителя, рис. 1 [11].



Рис. 1. Общий вид льдоаккумулятора компании Орелхолодмаш [11]

Fig. 1. General view of Orelkholodmash ice storage device [11]

В процессе работы системы охлаждения при низких на нее тепловых нагрузках на поверхности испарителя намораживается лёд толщиной до 40 мм (производится контроль системой автоматики). С увеличением нагрузки на систему охлаждения происходит таяние льда и охлаждение воды за счет теплоты плавления. Данные процессы периодически повторяются. В аппаратах в большинстве случаев предусматривают систему барботирования сжатого воздуха между трубками со льдом, что вызывает активное перемешивание воды и интенсивный теплообмен между охлаждаемой водой и поверхностью льда.

В Российской Федерации водо-ледные аккумуляторы холода первого типа выпускают более 10 компаний [11,16-22], преимущественно с трубчато-змеевиковыми испарителями. Орелхолодмаш [11] производит 5 моделей рассматриваемых аппаратов аккумулярующей емкостью 370–1387 кВтч (4096–15070 кг льда). Удельная масса выпускаемых аппаратов находится в пределах 5,08–3,12 кг/кВтч. Типоразмерный ряд льдоаккумуляторов компании AIRCOOL [16] включает в себя 5 модификаций с аккумулярующей емкостью (Q) 260–1560 кВтч. Удельная масса аппаратов находится в пределах 3,08–3,01 кг/кВтч. Под названным параметром подразумевается масса агрегата на единицу запасаемого холода. Общий вид трубчато-змеевикового испарителя этой компании представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид трубчато-змеевикового испарителя льдоаккумулятора компании AIRCOOL [16]

Fig. 2. General view of AIRCOOL's tube and coil ice storage evaporator [16]

Промышленные холодильные системы [18] предлагают льдоаккумуляторы аккумулярующей емкостью от 164 до 1050 кВтч с массой намораживаемого льда 1775–11360 кг. В каталоге фирмы представлены 20 модификаций накопителей. Компания «ТехноФрост» [19]

производит 6 модификаций льдоаккумуляторов с аккумулирующей емкостью в диапазоне 191–1260 кВтч (2050–13500 кг льда). Холодопроизводительность накопителей холода (Q_0) находится в диапазоне $(17-50) \div (100-300)$ кВт. В каталоге ООО «Термосистемы» [20] представлены 6 модификаций льдоаккумуляторов емкостью 283–1698 кВтч (3000–18000 кг льда). Также данная фирма выпускает 13 моделей льдоаккумуляторов в составе установок охлаждения молока емкостью 15,5–948 кВтч (168 -10266 кг льда). В каталоге предприятия «Арктика» [21] 26 модификаций льдоаккумуляторов. Технические характеристики не приведены. Типоразмерный ряд льдоаккумуляторов компании «Генераторы ледяной воды» [22] включает в себя 18 моделей аппаратов емкостью 15–2067 кВтч. Компания [22] также выпускает комплексные генераторы ледяной воды, укомплектованные холодильными машинами и другим оборудованием. В их состав входят льдоаккумуляторы с петельчатыми испарителями, 25 модификаций аккумулирующей емкостью 16,2–7614 кВтч; с панельными испарителями, 24 модификации емкостью 16,2–3366 кВтч. Компания также предлагает генераторы ледяной воды, оснащенные льдоаккумуляторами с петельчатыми теплообменниками с циркулирующим в них теплоносителем - водным раствором пропиленгликоля, 29 модификаций емкостью 16,2–12276 кВтч. К первому типу таких устройств относятся коаксиальные льдоаккумуляторы [23,24]. Рассматриваемые аппараты выпускаются также зарубежными производителями [25-27].

На рис. 3 представлен общий вид аккумулятора тип 2 с замораживанием воды в емкости вследствие кипения хладагента внутри теплообменной поверхности, выполненной из медных труб в виде спиралей [12].

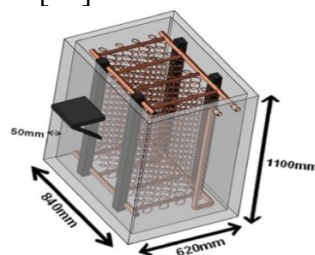


Рис. 3. Общий вид аккумулятора холода с замораживанием воды в емкости [12]

Fig. 3. General view of the cold storage with water freezing in the tank [12]

Масса замораживаемой воды порядка 350 кг, аккумулирующая емкость 32 кВтч, холодопроизводительность примерно 6,5 кВт. По исследованиям авторов [12] использование этого аппарата в СКВ обеспечивает в условиях Тайваня снижение расходов на электроэнергию на 11%. Авторы [13] выполнили исследования и предлагают льдоаккумуляторы второго типа, предназначенные для применения в жилых помещениях. Конструкция устройства состоит из чередующихся полиэтиленовых пакетов со льдом в виде параллелепипедов и проточных каналов для теплоносителя, рис. 4. Его емкость составляет 20 кВтч, масса льда 216 кг.

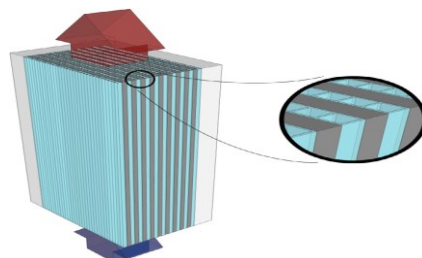


Рис. 4. Общий вид конструкции льдоаккумулятора с чередующимися параллелепипедами из полиэтилена для воды и каналами для циркуляции теплоносителя [13]

Fig. 4. General view of the ice storage design with alternating parallelepipeds made of polyethylene for water and channels for coolant circulation [13]

Использование аппарата обеспечивает замещение электрической нагрузки мощностью 4,2 кВт в течение более 2,3 ч. В качестве теплоносителя рассматривается водный раствор пропиленгликоля концентрацией 40 масс %. Авторы считают достоинством

данного устройства большую площадь теплообмена в сочетании с короткой характерной длиной самого накопителя энергии. Это позволяет достичь высоких тепловых потоков при относительно низкой разнице температур. По всей видимости аккумуляторы второго типа могут быть реализованы при их относительно небольших емкости и холодопроизводительности, составляющей не более 10–15 кВт. В данном сегменте Q_0 аппараты этого типа могут составить конкуренцию льдоаккумуляторам других конструкций. В доступных источниках информации не обнаружено сведений о массовом выпуске аккумуляторов второго типа.

Рассмотрим третий тип водо-ледных аккумуляторов холода. В данных аппаратах контейнеры с водой, являющейся теплоаккумулирующим веществом, располагаются в емкости с циркулирующим через нее теплоносителем. Контейнеры, выполняемые как правило из полиэтилена, могут быть различной формы. Преимущество отдается сферической и цилиндрической формам. Ряд компаний [28,29] выпускают аккумуляторы теплоты и холода такой конструкции. Они предлагаются с различными веществами с фазовым переходом с широким диапазоном температур накопления энергии, -100°C до $+885^{\circ}\text{C}$. Вода как ВФП в каталогах компаний отсутствует. В Турции в системе кондиционирования воздуха гипермаркета реализован рассматриваемый аппарат с водой в качестве ВФП [30]. Его применение обеспечило сокращение на 3900 кВтч (47%) ежедневной нагрузки СКВ, эксплуатационные расходы уменьшились на 60%, инвестиционные затраты окупались за 3 летних сезона. Аппарат представляет собой резервуар высотой 8 м и диаметром 4 м, заполненный 85 000 контейнерами со льдом диаметром 110 мм.

Обсуждение результатов. Авторы настоящей работы выполнили исследование теплообмена при плавлении водного льда в сферических колбах внутренним диаметром 64 мм, обтекаемых теплоносителем-водным раствором пропиленгликоля концентрацией 40 масс %. Полученные экспериментальные данные зависимости плотности теплового потока (q) от времени представлены на рис. 5. Из опытов следует, что средняя величина q составляет порядка 900 Вт/м². Результаты экспериментов могут быть использованы для оценки эффективности аппаратов третьего типа.

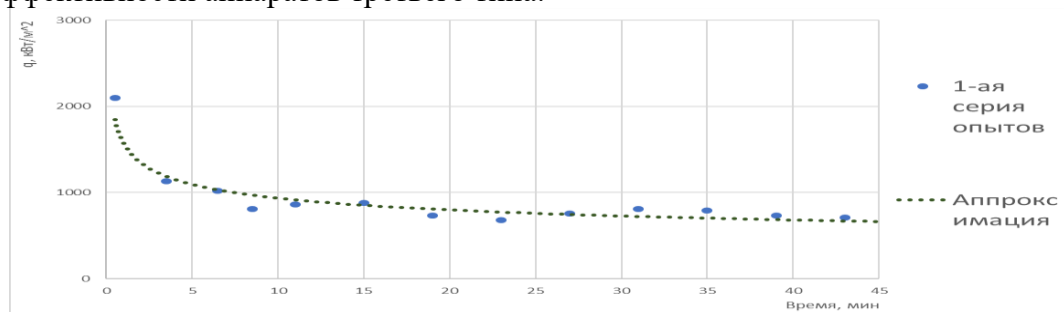


Рис. 5. Зависимость плотности теплового потока от времени при фазовом переходе твердая тело – жидкость для дистиллированной воды

Fig. 5. Time dependence of heat flux density at the solid-liquid phase transition for distilled water

Выполним сопоставление технических характеристик рассмотренных типов водо-ледных аккумуляторов холода в различных диапазонах их емкости и холодопроизводительности. Из каталогов и описаний на сайтах фирм производителей сделана следующая выборка. Максимальная емкость льдоаккумуляторов тип 1 достигает 2067 кВтч (22 300 кг льда), в генераторах ледяной воды ее максимальная величина 12276 кВтч [22]. У изделий аккумулирующей емкостью 2067 кВтч длина труб испарителя (диаметр 20 мм) достигает 4000 м [24]. При трубчато-змеевиковом исполнении масса испарителя составляет более 50% от массы не заполненного аппарата [16]. При емкости аккумулятора тип 1 1260 кВтч (13500 кг льда) его холодопроизводительность находится в пределах 100–300 кВт [19]. Очевидно, что нижнее значение соответствует охлаждению воды до 1–2 °С, а верхнее - 7–10 °С. Удельная металлоемкость аппаратов первого типа находится в пределах 3–5,8 кг/кВтч [11, 16, 22]. Она уменьшается по мере роста единичной емкости аппаратов. Из имеющихся в распоряжении каталогов следует, что удельный объем

аппаратов ($\text{дм}^3/\text{кВтч}$) изменяется в широком диапазоне, в зависимости от производителя. Минимальное значение этого показателя $21 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$ у изделий производства [22], максимальная величина составляет $44,5 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$ [20]. Отношение массы льда к общей массе воды в аппаратах с трубчато-змеевиковыми испарителями 37–39%, в конструкциях аппаратов с пластинчатыми испарителями объем льда составляет 80% от общего объема бака [22]. Расчетные величины изделий второго (рис. 4, [13]) и третьего типа. Удельная металлоемкость составляет $1,1\text{--}2,0 \text{ кг/кВтч}$. Удельный объем аппаратов второго типа порядка $17 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$, третьего типа – $24 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$ (сферические контейнеры) и $15 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$ (цилиндрические контейнеры).

Обсуждение результатов. Из приведенных результатов следует, что льдоаккумуляторы второго и третьего типа компактнее аппаратов первого типа. В связи с отсутствием металлической теплообменной поверхности их удельная металлоемкость ниже в 1,5–3 раза. Создаваемый тепловой поток рассматриваемых устройств (Q_0), как и любых теплообменных аппаратов, в первую очередь определяется площадью теплообменной поверхности, с которой в данном случае связана масса замораживаемой воды. На Q_0 влияют также геометрия теплообменной поверхности, температурный напор при теплообмене, условия кипения хладагента, скорости движения сред и их свойства. Поэтому холодопроизводительность льдоаккумуляторов, являющаяся условием потребителя, может изменяться в широких пределах при заданной теплообменной поверхности [19]. В связи с изложенным оценка и сопоставление эффективности разных типов аппаратов по величине Q_0 носит несколько условный характер. Удельной величиной может являться холодопроизводительность на единицу емкости аккумулятора в кВт/кВтч , однозначно определяемая массой водного льда. Только один российский производитель [19] указал в каталоге Q_0 , ее удельная величина (q_0) лежит в пределах $0,08\text{--}0,26 \text{ кВт/кВтч}$. Расчетные величины q_0 аппаратов второго и третьего типов для систем кондиционирования воздуха составляют $0,2\text{--}0,3 \text{ кВт/кВтч}$.

На основании выполненного анализа можно сделать вывод о том, что эффективность льдоаккумуляторов разных типов по удельной холодопроизводительности примерно одинакова. Из сопоставления технических характеристик льдоаккумуляторов различных типов следует, что аппараты второго и третьего типов имеют ряд преимуществ перед изделиями первого типа. Они компактнее, имеют меньшую в 1,5–3 раза металлоемкость. Их эффективность, оцениваемая по условной удельной холодопроизводительности, такая же, как и аппаратов первого типа. Теплоноситель в этих изделиях может быть охлажден не ниже $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$. В указанном диапазоне температур охлаждения теплоносителя и при более высоких значениях его температуры аппараты второго и третьего типов, при их массовом производстве, могут составить конкуренцию льдоаккумуляторам первого типа. Аппараты второго типа, вероятнее всего, могут быть созданы с Q_0 не более 15 кВт , что соответствует емкости примерно 70 кВтч и массе замораживаемого льда 755 кг .

Интерес представляют аккумуляторы третьего типа, в которых теплоаккумулирующее вещество (вода) располагается в контейнерах. Емкость и холодопроизводительность этих аппаратов может достигать достаточно больших величин. Емкость по холоду подобного устройства, установленного в Турции, составляет около 5000 кВтч [31]. Они могут заместить льдоаккумуляторы первого типа в большом числе технологий в силу их простоты и низкой металлоемкости при температурах теплоносителя не ниже $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$. На сегодняшний день нет достаточно большого массива расчетных и экспериментальных данных, которые позволяли бы проектировать аппараты третьего типа оптимальной конструкции и с достоверными характеристиками. Для разработки этих аппаратов необходимы исследования, которые должны включать в себя экспериментальное и численное изучение теплообмена при фазовом переходе лед – вода при различных параметрах. К ним относятся размеры и формы контейнеров со льдом, геометрия размещения контейнеров в емкости и условия их обтекания теплоносителем, величины плотностей тепловых потоков.

На основании полученных результатов следует разработать рациональную математическую модель для расчета льдоаккумуляторов третьего типа, которая позволяла бы проектировать аппараты оптимальной конструкции для заданных условий охлаждения.

Вывод. Выполненный анализ позволяет сформулировать следующие выводы.

Известны три вида водо-ледных аккумуляторов холода. Намораживание льда из потока воды на теплообменной поверхности, при этом вода также является теплоносителем (тип 1); замораживание воды во всем объеме емкости (тип 2); замораживание воды в контейнерах, омываемых теплоносителем (тип 3). Удельная металлоемкость аппаратов первого типа находится в пределах 3–5,8 кг/кВтч, второго и третьего типа – 1,1–2,0 кг/кВтч. Меньшие величины этого параметра у последних обусловлены отсутствием в них металлической теплообменной поверхности.

Эффективность льдоаккумуляторов всех трех типов по удельной холодопроизводительности примерно одинакова и находится в пределах 0,08–0,3 кВт/кВтч. В изделиях второго и третьего типов теплоноситель может быть охлажден не ниже 2–3 °С. В указанном диапазоне температур охлаждения теплоносителя и при более высоких значениях его температуры эти аппараты, при их массовом производстве, могут составить конкуренцию льдоаккумуляторам первого типа. Емкость аккумуляторов второго типа ограничена величиной примерно 70 кВтч. Интерес представляют аккумуляторы третьего типа, емкость которых может достигать значительных величин. Для их создания необходимо выполнить комплекс аналитических и экспериментальных исследований, включающий в себя изучение теплообмена при фазовом переходе лед-вода и разработку математической модели, которая позволяла бы рассчитывать аппараты в оптимальном конструктивном исполнении.

Библиографический список:

1. Sarbu, I., Sebarchievici, C. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage // Sustainability, 2018, № 10(1), p. 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
2. Luisa F. Cabeza, Alvaro de Gracia, Gabriel Zsembinszki, Emiliano Borri. Perspectives on thermal energy storage research // Energy. 2021, Vol. 231. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120943
3. Jose Pereira da Cunha, Philip Eames, Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review//Applied Energy, 2016;177:227-238, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>
4. Md. Shahriar Mohtasim, Barun K. Das. Biomimetic and bio-derived composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage applications: A thorough analysis and future research directions. Review article//Journal of Energy Storage 84 (2024) 110945. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110945>.
5. Eneja Osterman, Uroš Stritih. Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings//Journal of Energy Storage 39 (2021) 102569. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102569>.
6. Козлов Д.В. Моделирование ледовых явлений: учебное пособие. – М., 2020. – 145 с.
7. Bader Al-Aifan B., Parameshwaran R., Mehta K., Karunakaran R., Performance evaluation of a combined variable refrigerant volume and cool thermal energy storage system for air conditioning applications // International Journal of Refrigeration, №76, 2017, 271–295 с., doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.008.
8. Mohit Barthwal, Atul Dhar, Satvasheel Powar. The techno-economic and environmental analysis of genetic algorithm (GA) optimized cold thermal energy storage (CTES) for air-conditioning applications// Applied Energy 283 (2021) 116253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116253>
9. Sanaye S, Hekmatian M. Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes// Int J Refrig 2016;66:181–197. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.014
10. Emamzadeh Abolghasem, Ataei Abtin. A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings// Appl Therm Eng 2016.96:391–9. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.107
11. [Электронный ресурс]. URL: <https://orelholodmash.ru/product/cat/ldoakkumulyatory/>
12. Kai-Shing Yang, Yun-Sheng Chao, Chia-Hsing Hsieh, Chi-Chuan Wang. A novel hybrid ice storage design applicable for commercial showcase with refrigerator and freezer//Journal of Energy Storage 68 (2023) 107898. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107898>.
13. Andrea Mammoli, Matthew Robinson. Numerical analysis of heat transfer processes in a low-cost, high-performance ice storage device for residential applications// Applied Thermal Engineering 128 (2018) 453–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.043>.

14. A. Palacios a, M.E. Navarro-Rivero, B. Zou, Z. Jiang, M.T. Harrison, Y. Ding. A perspective on Phase Change Material encapsulation: Guidance for encapsulation design methodology from low to high-temperature thermal energy storage applications//Journal of Energy Storage 72 (2023) 108597. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108597>.
15. Бабакин Б.С., Воронин М.И., Семенов Е.В., Бабакин С.Б., Белозеров А.Г., Сучков А.Н. Теоретическое обоснование процесса охлаждения жидкости замороженными телами с развитой поверхностью//Вестник Международной академии холода. - 2019. - №2. - С.98–101. DOI: 10.17586/160643132019182-95-101.
16. [Электронный ресурс]. URL: <https://aircool.ru/>
17. https://termoservice63.ru/gienierator_liedianoj_vody_idoakkumulator_stoimost?etext=2202.4lSy9V4uxwyNL5_YfDp65roVuUFweyx32muuYJh4KjsJNDQIT4JP3PUwGB-qwIrsVVGfZ4usLPh0n8AqFv-d542_5ZKZHcwMj5WEAkLlvZRHLKoS9BID3K_7RDWp5WzY2Z0dG1keXJlc2FseGNwaw.de31e0a9b4fbc7dd827b8266500744e6fc81fc86&yclid=8033288342965583871 [Электронный ресурс].
18. URL: https://phs-holod.ru/manufacture/teploobmen_oborudovanie/ystanovki_s_OAL.html [Электронный ресурс].
19. URL: <https://www.tehnofrost.com/ru/catalog/produksiya-tehnofrost/oborudovanie-dlya-ledyanoy-vody/> [Электронный ресурс].
20. [Электронный ресурс]. URL: <https://minus.su/>
21. [Электронный ресурс]. URL: https://www.arktikal.ru/refrigerating_machinery/1096/
22. URL: https://molokoice.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=54 [Электронный ресурс].
23. Гончарова Г.Ю., Пытченко В.П., Борзов С.С., Борщев Г.В. Исследование процессов тепломассообмена при пленочном обтекании ледовых поверхностей с фазовым переходом на границе раздела // Вестник Международной академии холода. – 2021. – № 4. – С. 3–11. – DOI 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11.
24. Goncharova G. Yu., Korolev I. A., Borschev G. V. Performance of an Ice Bank with Falling Film Flow around a Melting Surface//Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 11. – P. 1386-1392. – DOI 10.3103/s1068798x23110114.
25. [Электронный ресурс]. URL: https://mayekawa.com/products/ice_storage/
26. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.made-in-china.com/factory/ice-cold-storage.html>
27. [Электронный ресурс]. URL: https://www.europages.co.uk/companies/ice_water_cold_storage_systems.html
28. Cristopia Energy Systems - Air Conditioning Systems India [Электронный ресурс]. URL: <https://cristopiaairconditioningsystemsindia.wordpress.com/>
29. Phase Change Material Products Limited: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pcmproducts.net/>
30. Dogan Erdemir, Necdet Altuntop, Yunus A. Çengel. Experimental investigation on the effect of ice storage system on electricity consumption cost for a hypermarket//Energy&Buildings 251(2021)111368.
31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111368>.

References:

1. Sarbu, I., Sebarchievici, C. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability*, 2018;10(1): 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
2. Luisa F. Cabeza, Alvaro de Gracia, Gabriel Zsembinszki, Emiliano Borri. Perspectives on thermal energy storage research. *Energy*. 2021; 231. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120943
3. Jose Pereira da Cunha, Philip Eames, Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. *Applied Energy*, 2016;177:227-238., <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>
4. Md. Shahriar Mohtasim, Barun K. Das. Biomimetic and bio-derived composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage applications: A thorough analysis and future research directions. Review article. *Journal of Energy Storage*. 2024; 84:110945. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110945>.
5. Eneja Osterman, Uroš Stritih. Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings. *Journal of Energy Storage*. 2021;39:102569. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102569>.
6. Kozlov D.V. Modeling ice phenomena: Textbook, 2020. (In Russ)
7. Bader Al-Aifan B., Parameshwaran R., Mehta K., Karunakaran R., Performance evaluation of a combined variable refrigerant volume and cool thermal energy storage system for air conditioning applications. *International Journal of Refrigeration*. 2017; 76:271–295 c., doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.008.
8. Mohit Barthwal, Atul Dhar, Satvasheel Powar. The techno-economic and environmental analysis of genetic algorithm (GA) optimized cold thermal energy storage (CTES) for air-conditioning applications. *Applied Energy*. 2021; 283:116253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116253>
9. Sanaye S, Hekmatian M. Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes. *International Journal of Refrigeration*. 2016;66:181–197. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.014

10. Emamzadeh Abolghasem, Ataei Abtin. A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings. *Appl Therm Eng.* 2016; 96:391–9. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.107
11. URL: <https://orelholodmash.ru/product/cat/ldoakkumulyatory/>
12. Kai-Shing Yang, Yun-Sheng Chao, Chia-Hsing Hsieh, Chi-Chuan Wang. A novel hybrid ice storage design applicable for commercial showcase with refrigerator and freezer. *Journal of Energy Storage.* 2023; 68: 107898. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107898>.
13. Andrea Mammoli, Matthew Robinson. Numerical analysis of heat transfer processes in a low-cost, high-performance ice storage device for residential applications. *Applied Thermal Engineering.* 2018; 128:453–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.043>.
14. A. Palacios a, M.E. Navarro-Rivero, B. Zou, Z. Jiang, M.T. Harrison, Y. Ding. A perspective on Phase Change Material encapsulation: Guidance for encapsulation design methodology from low to high-temperature thermal energy storage applications. *Journal of Energy Storage.* 2023;72:108597. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108597>.
15. Babakin B.S., Voronin M. I., Semenov E.V., Babakin S.B., Belozarov A.G., Suchkov A.N. Substantiation of liquid cooling by introducing the frozen balls with developed surface. *Journal of the International Academy of Refrigeration.* 2019; 2: 95–101. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-95-101. (In Russ)
16. URL: <https://aircool.ru/>
17. URL: https://termoservice63.ru/gienierator_liedianoj_vody_ldoakkumuliator_stoimost?etext=2202.4lSy9V4uxwyNL5_YfDp65roVuUFweyx32muuYJh4KjsJNDQIT4JP3PUwGB-qwIrsWVGfZ4usLPh0n8AqFv-d542_5ZKZHcwMj5WEAKLlvZRHLLKoS9BID3K_7RDWp5WzY2Z0dG1keXJ1c2FseGNwaw.de31e0a9b4fbc7dd827b8266500744e6fc81fc86&yclid=8033288342965583871
18. URL: https://phs-holod.ru/manufacture/teplobmen_oborudovanie/ystanovki_s_OAL.html
19. URL: <https://www.tehnofrost.com/ru/catalog/produktsiya-tekhnofrost/oborudovanie-dlya-ledyanoy-vody/>
20. URL: <https://minus.su/>
21. URL: https://www.arktikal.ru/refrigerating_machinery/1096/
22. URL: https://molokoice.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=54
23. Goncharov G. Yu., Pytchenko V. P., Borzov S. S., Borschev G. V. Heat and mass transfer during film flow around ice surfaces with a phase transition at the interface. *Journal of the International Academy of Refrigeration.* 2021; 4: 3-11. -DOI 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11. (In Russ)
24. Goncharova G.Yu., Korolev I.A., Borschev G.V. Performance of an Ice Bank with Falling Film Flow around a Melting Surface. *Russian Engineering Research.* 2023;43(11):386-1392. DOI 10.3103/s1068798x23110114.
25. URL: https://mayekawa.com/products/ice_storage/
26. URL: <https://www.made-in-china.com/factory/ice-cold-storage.html>
27. URL: https://www.europages.co.uk/companies/ice_water_cold_storage_systems.html
28. Cristopia energy systems. URL: <https://cristopiaairconditioningsystemsindia.wordpress.com/>
29. Phase Change Material Products Limited. URL: <http://www.pcmproducts.net/>
30. Dogan Erdemir, Necdet Altuntop, Yunus A. Çengel. Experimental investigation on the effect of ice storage system on electricity consumption cost for a hypermarket. *Energy & Buildings.* 2021;251:111368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111368>.
31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111368>.

Сведения об авторах:

Александр Владимирович Бараненко, доктор технических наук, профессор; avbaranenko@itmo.ru, ORCID: 0000-0003-3675-9513

Вячеслав Викторович Тамаров, магистрант; vvtamarov@itmo.ru, ORCID: 0009-0003-7748-8569

Матвей Владимирович Короленко, аспирант; mvkorolenko@itmo.ru, ORCID: 0009-0001-6186-6583

Information about authors:

Aleksandr V. Baranenko, Dr. Sci. (Eng), Prof.; avbaranenko@itmo.ru, ORCID: 0000-0003-3675-9513

Viacheslav V. Tamarov, Master Student; vvtamarov@itmo.ru, ORCID: 0009-0003-7748-8569

Matvey V. Korolenko, Graduate student; mvkorolenko@itmo.ru, ORCID: 0009-0001-6186-6583

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 14.10.2024.

Одобрена после рецензирования/Reviced 01.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 01.11.2024.