

УДК 621.56

## Энергоэффективные системы с использованием вакуумно-испарительных ледогенераторов бинарного льда

Канд. техн. наук **Круглов А.А.** al-x-kru@yandex.ru

**Тазитдинов Р.Р.** t.r\_92@mail.ru

**Мелекесцева В.М.** kochenkov63@mail.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Сбережение ресурсов, энергии и применение природных хладагентов в холодильных системах является одним из базовых векторов инновационного развития нашей страны. Одним из перспективных путей решения этих проблемы является применение вакуумно-испарительных ледогенераторов с системой аккумуляции холода при помощи бинарного льда совместно с энергосберегающими технологиями, использующими возобновляемые источники энергии. В статье описан принцип получения льда в вакуумно-испарительной установке. Рассмотрены достоинства и недостатки способов получения льда в парокомпрессионных и вакуумно-испарительных установках. Приведено сравнение расхода электроэнергии парокомпрессионными и вакуумными ледогенераторами при получении льда и тепловыми насосами с использованием в качестве источника тепла воздуха и морской воды. Рассмотрены энергоэффективные установки с применением вакуумно-испарительных ледогенераторов в системах аккумуляции холода; в комбинированных системах охлаждения и отопления; с тепловым насосом.*

*Ключевые слова:* бинарный лед, жидкий лед, вакуумно-испарительный ледогенератор, аккумуляция холода, тепловой насос.

---

## Energy-efficient systems with use of vacuum-evaporation ice slurry generator

*Ph.D. Kruglov A.A.* al-x-kru@yandex.ru

**Tazitdinov R.R.** t.r\_92@mail.ru

**Melekestseva V.M.** kochenkov63@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*The saving of resources, energy and the use of natural refrigerants in refrigeration systems is one of the basic vectors of the innovative development of our country. One of the promising ways to solve these problems is the use of vacuum-evaporation ice generator with using an ice slurry storage system, together with energy-saving technologies using renewable energy sources. The article describes the principle of ice production in the vacuum-evaporation ice generator. The advantages and disadvantages of the methods of obtaining ice in vapor-compression refrigeration systems and vacuum evaporative plants are considered. A comparison is made between the consumption of electricity by vapor-compression refrigeration and vacuum ice makers in the production of ice, and heat pumps using air and seawater as a source of heat. Energy-efficient plants using vacuum-evaporative ice generators in cold storage systems are considered; in combined cooling and heating systems; with a heat pump.*

*Keywords:* ice slurry, vacuum-evaporation ice generator, thermal energy storage, heat pump.

---

### Введение

Популярность холодильных установок с системами аккумуляции холода с каждым годом растет. Это объясняется более низкой стоимостью электроэнергии в ночное время (дифференцированный тариф) и снижением температуры конденсации в системах с воздушными конденсаторами [1]. Целесообразность применения аккумуляторов холода обусловлена наличием выраженного пикового теплопритока, который превышает среднесуточный на 40 – 50 %, а его единовременная продолжительность составляет не более четырех часов [2]. Различают два вида аккумуляции холода: с однофазным хладоносителем и хладоносителем с фазовым переходом. При аккумуляции холода с помощью однофазного хладоносителя отвод теплоты происходит за счет разности температур (чаще всего 6 – 10 К). При использовании хладоносителей с фазовым переходом теплота отводится за счет скрытой теплоты плавления льда при постоянной температуре (около 0°C).

Аккумуляция с фазовым переходом можно осуществить путем намораживания слоя льда на поверхности теплообменника или приготовлением бинарной смеси. Аккумуляция холода с помощью однофазного хладоносителя имеет значительно более низкую плотность хранения тепловой энергии и требует большие объемы емкостей хранения (рис. 1). Например, один кубический метр холодной воды имеет заряд в 7кВт·ч (при разнице температур от 6 °С до 12 °С), что более чем в 12 раз меньше чем в одном кубическом метре чистого льда (при постоянной температуре 0°С) [3, 4].

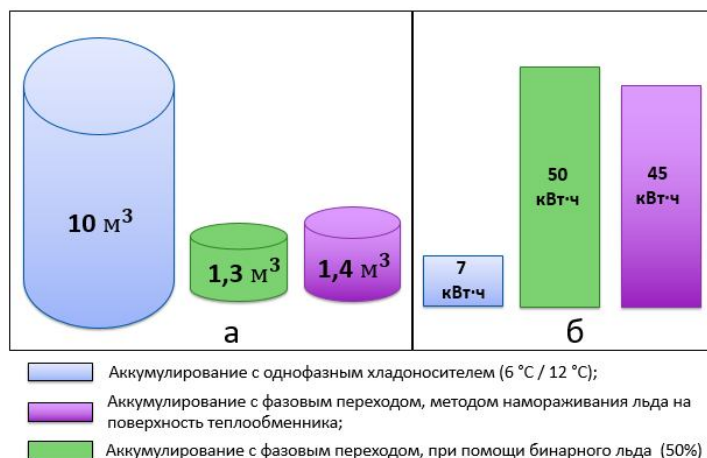


Рис. 1. Сравнение аккумуляторов холода:

*а* – объем емкости хранения при одинаковой мощности тепловой энергии;  
*б* – мощность тепловой энергии в 1м<sup>3</sup>

При аккумуляции холода методом намораживания льда на поверхности теплообменника (рис. 2) используется емкость для хранения с теплообменником. Для заряда аккумулятора (производства льда) внутри теплообменника кипит хладагент при температуре от минус 8 °С до минус 12 °С и на поверхности труб теплообменника образуется лёд. С увеличением толщины намораживаемого льда на поверхности теплообменника возрастает значение сопротивления теплопередаче между хладагентом и водой. Это приводит к снижению производства количества льда за единицу времени и рост употребления электроэнергии парокомпрессионной холодильной машиной. Для предотвращения энергетических потерь, используются большие площади теплообменников с увеличенным межтрубным пространством для лучшей циркуляции хладоносителя. При возникновении потребности в холоде, хладоноситель циркулирует, омывая поверхность теплообменника, а замороженный лед снимает теплоту (разряжая аккумулятор). Из-за необходимости размещения в емкостях для хранения объемных теплообменников, на сегодняшний день технологии позволяют хранить около 45 – 55 кВт·ч энергии [5] в одном кубическом метре.

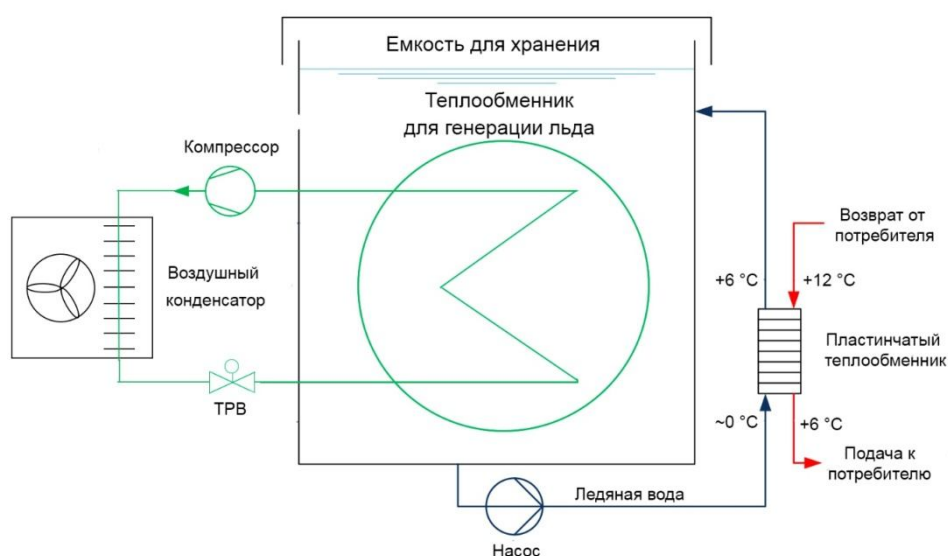


Рис. 2. Система аккумуляции холода с фазовым переходом, методом намораживания льда на поверхности теплообменника

Аккумуляторы холода с использованием бинарного льда (двухфазного хладоносителя) имеют множество преимуществ по сравнению выше приведенными технологиями. Бинарный лёд состоит из смеси жидкости и мелких частиц льда, размер которых не превышает 0,5 мм [6], массовая доля льда может варьироваться от 5 до 50 % [7]. Бинарный лёд уже достаточно давно применяется во многих отраслях промышленности, но пока широко не используется для аккумуляции энергии в больших объемах. Одним из основных преимуществ бинарного льда является способность к его перекачиванию с помощью обычных центробежных насосов. Это позволяет снизить массогабаритные показатели не только емкостей для хранения, но и трубопроводов, запорной арматуры и теплообменного оборудования, за счет высокой охлаждающей способности, создаваемой многочисленными кристаллами льда [8].

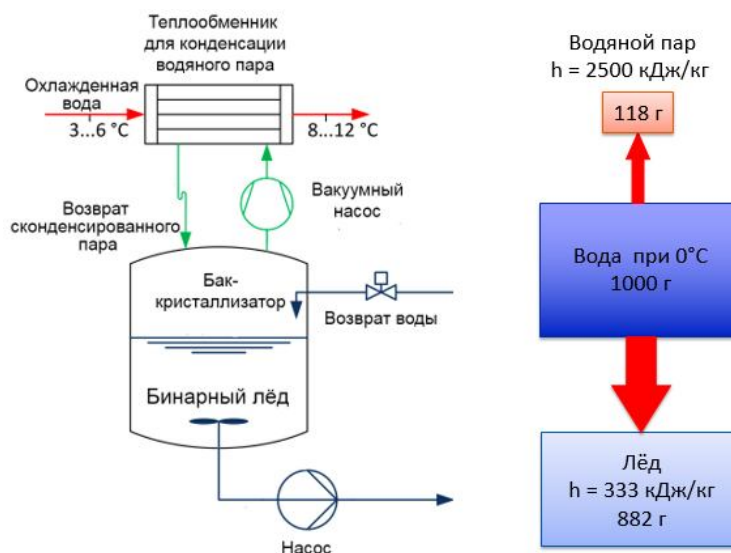


Рис. 3. Схема вакуумного льдогенератора

Технология производства льда в вакууме основывается на испарении воды вблизи тройной точки (611 Па, 0,01 °C) [9]. Из герметичного бака-кристаллизатора, частично заполненного водой, при помощи вакуумного насоса откачивается водяной пар, при этом снижая в нём давление. При достижении давления ниже тройной точки происходит испарение с поверхности жидкости с образованием при этом ледяных частиц. Откачиваемый водяной пар конденсируется в теплообменнике (рис. 3) [10].

Скрытая теплота парообразования (~2400 кДж/кг) в несколько раз превышает теплоту кристаллизации воды (333,55 кДж/кг). Соответственно, при испарении 118 грамм воды, можно произвести 882 грамма льда (рис. 3).

Преимуществами вакуумных установок являются: упрощённая технологическая схема установки, поскольку вода может быть, как холодильным агентом, так и хладоносителем; возможность получения водного льда с оптимальной, с точки зрения энергозатратности, температурой 0,5 °C, что трудно реализуемо в парокompрессионных установках. Недостатком вакуумной технологии является процесс откачивания водяного пара при низких давлениях. Плотность водяного пара при низком давлении примерно в 270 раз меньше плотности воздуха при нормальных условиях. Это приводит к высокой скорости откачки вакуумного насоса и относительно высокому коэффициенту сжатия (табл. 1).

Таблица 1

**Зависимость скорости откачки от холодопроизводительности**

Холодопроизводительность, кВт	Производительность льдогенератора <sup>1</sup> , кг/ч	Скорость откачки водяного пара <sup>2</sup> , м <sup>3</sup> /с
50	540	4,5
250	2699	22,4
500	5397	44,7
1000	10795	89,4

<sup>1</sup>при температуре воды на входе 0 °C

<sup>2</sup>при температуре испарения минус 1 °C

Расход энергии при получении льда в парокомпрессионных установках на 30 % больше, чем в вакуумно-испарительных установках (табл. 2, поз. 3, 5). Если производство льда (зарядка ледоаккумуляторов) осуществляется в ночное время, эффективность системы может быть повышена за счёт более низкой температуры конденсации (табл. 2, поз. 4, 6). Значительный расход энергии при получении льда с помощью вакуумного ледогенератора идёт на охлаждение воды чиллером для конденсации водяного пара (рис. 4) [11].

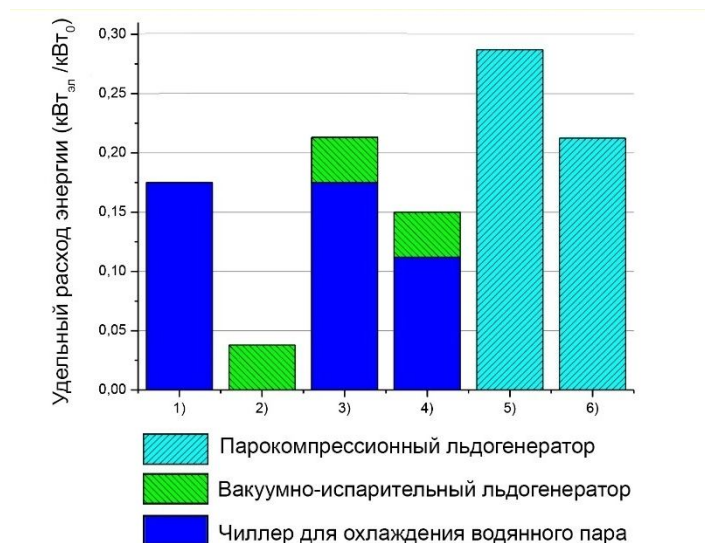


Рис. 4. Расход энергии при получении льда с помощью вакуумного и парокомпрессионного генератора

Таблица 2

Сравнение эффективности производства льда в вакуумной и парокомпрессионной установках [11]

Поз.	Тип установки	Температура кипения, °С	Температура конденсации, °С	EER	Уд. энергозатраты
1	Чиллер для охлаждения воды до 6/12 °С, для конденсации водяного пара (R717, η = 0,7)	4	34	5,71	0,175
2	Вакуумно-испарительный ледогенератор (R718, η = 0,65)	-0,5	6	26,2	0,038
3	Вакуумно-испарительная установка (поз. 1 и поз. 2)	-0,5	34	4,68	0,213
4	Вакуумно-испарительная установка. Работает в <b>ночное время</b>	-0,5	24	6,67	0,150
5	Парокомпрессионный ледогенератор скребкового или блочного типа (R717, η = 0,7)	-10	34	3,49	0,287
6	Парокомпрессионный ледогенератор скребкового или блочного типа. Работает в <b>ночное время</b>	-10	24	4,71	0,212

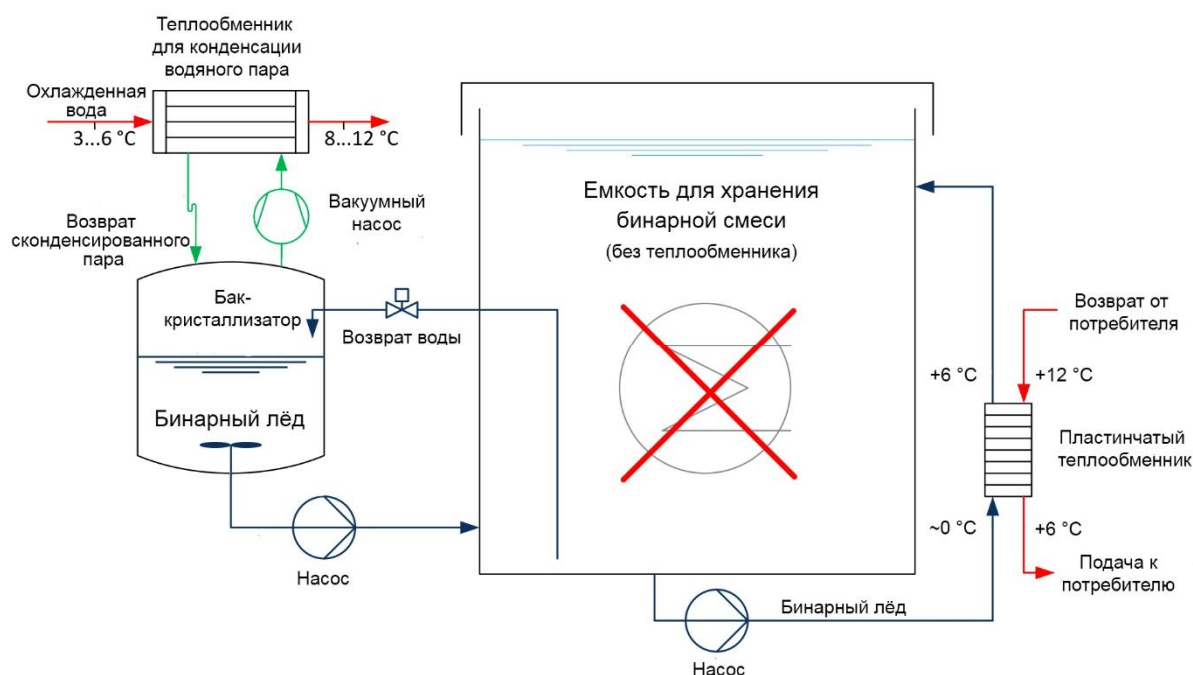


Рис. 5. Схема вакуумно-испарительного ледогенератора с системой аккумуляции холода при помощи бинарного льда

Производство бинарного льда в вакуумно-испарительных установках является довольно новой технологией, применяемой в установках средней и большой мощности. Данный способ производства может использоваться для аккумуляции холода. Система аккумуляции холода (рис. 5) состоит из вакуумно-испарительной установки, описанной выше и одной или нескольких ёмкостей для хранения льда. В ночное время, когда снижены тарифы на электроэнергию, и возможно понижение температуры конденсации в системах с воздушными конденсаторами, вакуумный ледогенератор производит бинарную смесь и перекачивает её в ёмкости для хранения. Ёмкости для хранения в таких системах не нуждаются в дополнительном теплообменнике, так как температура бинарной смеси постоянна (не выше  $0^{\circ}\text{C}$ ) за счёт наличия частиц льда. В небольших установках ёмкостью для хранения бинарной смеси может служить нижняя часть бака-кристаллизатора. Система аккумуляции холода с использованием бинарной смеси полностью исключает необходимость в дополнительном контуре с хладоносителем.

Первая такая система была реализована в германском университете прикладных наук в Цвиккау. Описание и характеристики этой установки представлены в [12].

Тепловые насосы являются важным элементом увеличения использования возобновляемых источников энергии и становятся все более распространенными. Различают три основных природных источника теплоты, применяемых в тепловых насосах:

- воздух;
- грунт;
- вода (природные водоёмы).

В настоящее время наиболее распространены тепловые насосы, использующие атмосферный воздух, из-за низких инвестиционных затрат, но эффективность таких систем снижается с понижением температуры окружающей среды. Существенным недостатком тепловых насосов, использующих в качестве источника тепла грунт, являются высокие инвестиционные затраты на теплообменник. Грунтовые воды или вода из природного водоёма, в качестве теплоисточника, сохраняют относительно высокую и стабильную температуру круглый год, тем самым повышают эффективность теплового насоса.

Проведены расчеты энергопотребления теплового насоса, с использованием в качестве источника тепла атмосферного воздуха и морской воды, на примере здания в г. Осло. Тепловая нагрузка здания, без учёта нагрева воды на технологические нужды, составляет 6717 МВт·ч/год. Расчёты не учитывали ограниченную производительность теплового насоса с воздушным источником при низкой температуре окружающей среды, когда часто требуется дополнительное электрическое отопление. В табл. 3 приведены результаты расчетов для двух температур подаваемого теплого воздуха  $35^{\circ}\text{C}$  и  $45^{\circ}\text{C}$ . Тепловой насос с использованием морской воды в качестве теплового источника, потреблял электрическую энергию примерно на 25 % меньше по сравнению с воздушным тепловым насосом [12].



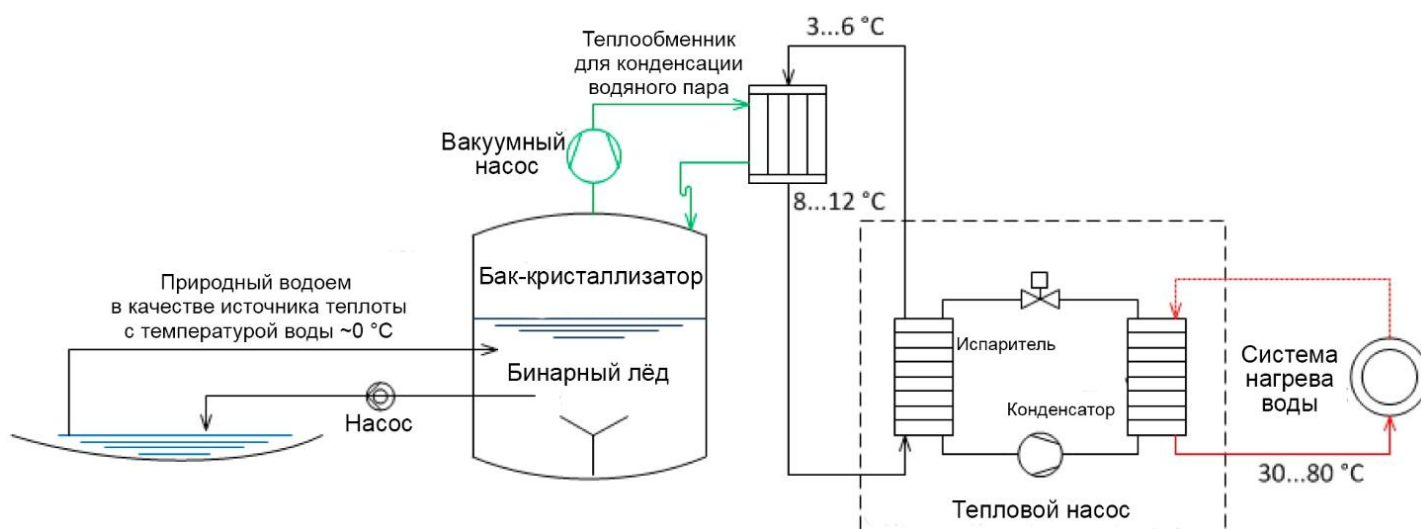
Таблица 3

**Сравнение энергетических показателей теплового насоса с использованием в качестве источника тепла атмосферного воздуха и морской воды, на примере здания в Осло [12]**

Тепловой насос	Потребление электроэнергии тепловым насосом	Сезонный/годовой КПД теплового насоса
Тепловой насос с НПП – воздух. Температура подачи воздуха 35 °С	1,846 МВт·ч	3,64
Тепловой насос с НПП – воздух. Температура подачи воздуха 45 °С	2,301 МВт·ч	2,92
Тепловой насос с НПП – морская вода. Температура подачи воздуха 35 °С	1,421 МВт·ч	4,73
Тепловой насос с НПП – морская вода. Температура подачи воздуха 45 °С	1,713 МВт·ч	3,92

Во многих отраслях, помимо охлаждения, требуется нагрев воды для технологических нужд или отопления. Для повышения эффективности системы (рис. 6, 7) [13] теплоту конденсации парокомпрессионной холодильной машины, применяемой для конденсации водяного пара, можно использовать для нагрева воды в баке-аккумуляторе (бойлере) или в качестве источника низкого потенциала в тепловом насосе.

На рис. 6 представлена комбинированная система аккумулирования холода с тепловым насосом. В зимний период времени, когда потребность в холоде отсутствует, вода из природного водоема (с температурой выше 0 °С), подаваемая в бак-кристаллизатор, используется в качестве источника теплоты для работы теплового насоса. В летний период система работает в режиме охлаждения с аккумуляцией холода.



*Рис. 6. Комбинированная система аккумулирования холода с помощью бинарной смеси и теплового насоса с использованием природного водоема в качестве источника тепла в холодный период*

Во многих случаях потребность в охлаждении и отоплении (нагреве воды) не совпадают. Комбинированная система с аккумулированием холода и аккумулированием горячей воды является более гибкой и независимой в сравнении с обычными холодильными системами с рекуперацией тепла. В периоды, когда потребность в нагретой воде выше, чем нагрузка на систему охлаждения, массовая доля льда в емкости хранения увеличивается. Если выше нагрузка на систему охлаждения, дополнительное охлаждение обеспечивается из ёмкости для хранения бинарной смеси, и массовая доля льда уменьшается.

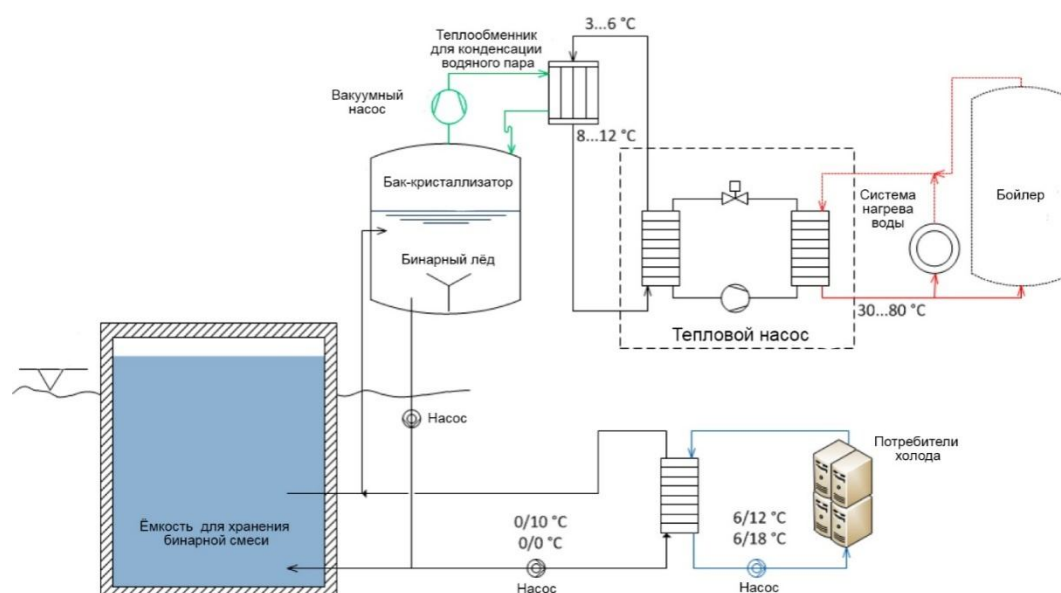


Рис. 7. Схема комбинированной установки с использованием аккумуляции холода при помощи бинарного льда и систем рекуперации тепла

Добавление теплообменника воздух-вода позволяет использовать низкую температуру окружающего воздуха в холодный сезон для охлаждения и хранения льда. Этот же теплообменник можно использовать в качестве рекуператора для теплового насоса, чтобы обеспечить охлаждение, при отсутствии льда в аккумуляторе [13].

### Выводы

Получение бинарного льда в вакуумно-испарительных ледогенераторах является эффективным и экологичным способом в сравнении с парокомпрессионными ледогенераторами.

Вакуумно-испарительные установки для получения бинарного льда могут использоваться в системах аккумуляции холода; в комбинированных системах охлаждения и отопления; совместно с тепловым насосом, с использованием в качестве источника тепла либо емкости для хранения льда, либо природного водоёма.

### Литература

1. *Круглов А.А., Тазитдинов Р.Р., Цой А.П.* Основные типы аккумуляторов холода с использованием бинарного льда // VI Международная научно-техническая конференция «Казахстан-Холод 2016» (1–2марта 2016 г.): сборник докладов конференции. 2016. С. 144–148.
2. *Бараненко А.В., Калюнов В.С., Румянцев Ю.Д.* Практикум по холодильным установкам: учеб. пособие / А.В. Бараненко, В.С. Калюнов, Ю.Д. Румянцев. – СПб: ИД «Профессия», 2012. – 304 с., ил.
3. *Kasza K., Chen M.* 1987. Assessment of Impact of AdvancedEnergy Transmission Fluids on District Heating and CoolingSystems (Phase I). Argonne National Laboratory. Report:ANL-87-21.
4. *Joensen S., Sørensen N.K., Akse L.* February 2001. Cod: Storagein Ice Water Increases Weight. In: Fiskeri for skning Info, vol. 1.
5. FlüssigeiszurKälte – und Wärmeversorgung [Электронный ресурс] / InstitutfürLuft- und Kältetechnik Dresden gGmbH. – Режимдоступа: [http://www.ilkdresden.de/fileadmin/user\\_upload/170130\\_Broschuere\\_Vakuumeis\\_de.pdf](http://www.ilkdresden.de/fileadmin/user_upload/170130_Broschuere_Vakuumeis_de.pdf) – (Датаобращения: 24.02.2018).
6. *Тазитдинов Р.Р., Круглов А.А.* Выбор параметров бинарного льда для получения в вакуумно-выпарной установке на основе исследований его свойств // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2017. Т. 1. С. 274–277.
7. *Egolf P.W., Kauffeld M.* From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications // International Journal of Refrigeration. 2005; 28: P. 4–12.
8. *Kauffeld M., Wang M.J., Goldstein V., Kasza K.E.* Ice slurry applications // International Journal of Refrigeration. 33 (8) (2010) 1491-1505.

9. *Калнинь И.М., Маринюк Б.Т., Крысанов К.С.* Вакуумно-испарительные холодильные системы // Вестник Международной академии холода. 2013. 1. С. 34–38.
10. *Круглов А.А., Тазитдинов Р.Р.* Применение расчетной модели установки для получения «бинарного льда». Анализ результатов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2017. № 1(25). С. 1–7
11. *Steffan C., Honke M., Safarik M.* Operational experiences with an ice slurry cold thermal storage systems using the R718 direct evaporation ice generation process // Proceedings of 11th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, Karlsruhe, Germany, IIR. 2016.
12. *Safarik M., Honke M., Steffan C., Burandt B.* Applications of the direct evaporation vacuum freezing technology // Proceedings of 11th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, Karlsruhe, Germany, IIR. 2016.
13. Technology of ice slurry production in vacuum [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ilkdresden.de/leistungen/produkte-und-prototypenbau/projekt/vakuum-fluessigeis-technologie/> – (Дата обращения: 5.11.2017).

### References

1. *Kruglov A.A., Tazitdinov R.R., Tsoi A.P.* Osnovnye tipy akkumulyatorov kholoda s ispol'zovaniem binarnogo l'da // VI Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Kazakhstan-Kholod 2016» (1–2marta 2016 g.): sbornik dokladov konferentsii. 2016. S. 144–148.
2. *Baranenko A.V., Kalyunov V.S., Rummyantsev Yu.D.* Praktikum po kholodil'nym ustanovkam: ucheb. posobie / A.V. Baranenko, V.S. Kalyunov, Yu.D. Rummyantsev. – SPb: ID «Professiya», 2012. – 304 s., il.
3. *Kasza K., Chen M.* 1987. Assessment of Impact of Advanced Energy Transmission Fluids on District Heating and Cooling Systems (Phase I). Argonne National Laboratory. Report: ANL-87–21.
4. *Joensen S., Sørensen N.K., Akse L.* February 2001. Cod: Storage in Ice Water Increases Weight. In: Fiskeri for skning Info, vol. 1.
5. Flüssigeis zur Kälte – und Wärmeversorgung [Elektronnyi resurs] / Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gmbH. – Rezhim dostupa: [http://www.ilkdresden.de/fileadmin/user\\_upload/170130\\_Broschuere\\_Vakuumeis\\_de.pdf](http://www.ilkdresden.de/fileadmin/user_upload/170130_Broschuere_Vakuumeis_de.pdf) – (Data obrashcheniya: 24.02.2018).
6. *Tazitdinov R.R., Kruglov A.A.* Vybora parametrov binarnogo l'da dlya polucheniya v vakuumno-vyparnoi ustanovke na osnove issledovaniya ego svoystv // *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO.* 2017. T. 1. S. 274–277.
7. *Egolf P.W., Kauffeld M.* From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications // *International Journal of Refrigeration.* 2005; 28: R. 4–12.
8. *Kauffeld M., Wang M.J., Goldstein V., Kasza K.E.* Ice slurry applications // *International Journal of Refrigeration.* 33 (8) (2010) 1491-1505.
9. *Kalnin' I.M., Marinyuk B.T., Krysanov K.S.* Vakuumno-isparitel'nye kholodil'nye sistemy // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2013. 1. S. 34–38.
10. *Kruglov A.A., Tazitdinov R.R.* Primenenie raschetnoi modeli ustanovki dlya polucheniya «binarnogo l'da». Analiz rezul'tatov // *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie.* 2017. № 1(25). S. 1–7
11. *Steffan C., Honke M., Safarik M.* Operational experiences with an ice slurry cold thermal storage systems using the R718 direct evaporation ice generation process // Proceedings of 11th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning. Karlsruhe, Germany, IIR. 2016.
12. *Safarik M., Honke M., Steffan C., Burandt B.* Applications of the direct evaporation vacuum freezing technology // Proceedings of 11th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning. Karlsruhe, Germany, IIR. 2016.
13. Technology of ice slurry production in vacuum [Elektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.ilkdresden.de/leistungen/produkte-und-prototypenbau/projekt/vakuum-fluessigeis-technologie/> – (Data obrashcheniya: 5.11.2017).

Статья поступила в редакцию 24.03.2018 г.