

DOI: <https://doi.org/10.17816/Rf105654>

Системы накопления холода: настоящее и перспективы применения (взгляд из Ближневосточного региона)

Б.М. Менин

Беэр-Шева, Израиль

АННОТАЦИЯ

Целью данной статьи является обзор существующих типов систем накопления холода (СНХ) на основе известных технологий и рекомендации по их совершенствованию. В статье сочетаются исследования, термодинамический анализ, экономические аспекты и сравнение качества известных конструкций СНХ. Статья представляет интерес для государственных служащих, производителей, инженеров, изобретателей и разработчиков для определения преимуществ и недостатков существующих СНХ. Приведены причины, сдерживающие использование СНХ в Израиле. С учетом современного зарубежного опыта создания конструкций резервуаров низкотемпературной энергии и достижений технологии производства бинарного льда (ice-slurry) предлагаются СНХ и программное обеспечение для технико-экономического анализа её работы.

Ключевые слова: хранение низкотемпературной энергии; технология бинарного льда; снижение пикового спроса на электроэнергию.

Для цитирования:

Менин Б.М. Системы накопления холода: настоящее и перспективы применения (взгляд из Ближневосточного региона) // Холодильная техника. 2022. Т. 111. № 2. С. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.17816/Rf105654>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF105654>

Cold storage systems: present and future applications (a view from the Middle East region)

Boris M. Menin

Beer Sheva, Israel

ABSTRACT

The aim of this article is to review the existing types of cold storage systems (CSS) based on known technologies and recommendations for their improvement. The article combines research, thermodynamic analysis, economic aspects and comparison of the quality of known CSS designs. The article is of interest for government officials, manufacturers, engineers, inventors and developers to determine the advantages and disadvantages of existing CSSs. The reasons constraining the use of CSS in Israel are given. Taking into account modern foreign experience in developing “cold” low-temperature energy tank designs and achievements of the ice-slurry production technology of pumped ice slurries, the CSS is proposed, a software is developed and technical and economic analysis of its operation is carried out.

Keywords: low-temperature energy storage; binary ice technology; reducing peak power demand.

To cite this article:

Menin BM. Cold storage systems: present and future applications (a view from the Middle East region). *Refrigeration Technology*. 2022;111(2):79–88.
DOI: <https://doi.org/10.17816/RF105654>

Received: 30.03.2022

Accepted: 16.05.2022

Published online: 18.12.2022

ВСТУПЛЕНИЕ: НА ПЕРЕПУТЬЕ

Я сразу заявляю, что не являюсь сторонником всеобъемлющего внедрения ветряных турбин и фотоэлектрических панелей (ВТФЭП), которые, возможно, вместе с параллельно установленными абсорбционными машинами займут достойное место в мировой энергетике через 15–20 лет. Я с осторожностью отношусь к усилиям правительств ведущих стран мира, огромным инвестициям в фирмы, производящие ВТФЭП, респектабельным научным статьям и футуристическим прогнозам в борьбе за снижение зависимости от невозобновляемых источников энергии. Хочу подчеркнуть: я не пропагандирую ВТФЭП и не осуждаю их. Я просто замечаю, что рациональное внедрение ВТФЭП было подорвано нереалистичными рыночными прогнозами и игнорированием экологических последствий, связанных с производством и эксплуатацией этих устройств. В 2016 г. 68% электроэнергии в мире приходилось на ископаемое топливо; 5,2% – на ветровую и солнечную энергию, а остальное – на гидроэнергетику и атомную энергетику. В 2017 г. ВТФЭП вместе составляли около 10% установленной мощности в мире, но на их долю приходилось лишь около 4% производства [1]. Кроме того, есть экологические последствия – если ВТФЭП должны уменьшить углеродный след (и, таким образом, уменьшить масштабы глобального потепления), они не должны использовать электричество на этапе строительства. И даже если бы ВТФЭП работали на возобновляемых источниках энергии, парниковые газы все равно образовывались бы при производстве цемента, стали и прочих использованных при их строительстве комплектующих и материалов.

Я не утверждаю, что это аргументы против принятия ВТФЭП. Я просто указываю на то, что последствия новой технологии должны быть оценены и поняты, прежде чем делать какие-либо радикальные заявления в их пользу. Мы не можем представить себе идеальные, экологически чистые машины, а затем сразу их создать.

На известный вопрос Н.Г. Чернышевского «Что делать?», есть ответ.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПО-ПРЕЖНЕМУ ДЕШЕВЛЕ, ЧЕМ ПРОИЗВОДСТВО ЭНЕРГИИ

Надеюсь, что большинство читателей согласится с тем, что, с одной стороны, мы являемся свидетелями изменения климата, повышения выбросов в атмосферу, с другой – наблюдаем усиливающуюся неспособность политической элиты поддерживать стабильность развития, обеспечивать рациональное использование национальных ресурсов и гарантировать благосостояние для большинства населения Земли.

В этих условиях, возвращаясь к теме статьи и исходя из накопленных знаний, опыта и интуиции, автор предлагает на суд читателей давно известный, по крайней мере холодильщикам, *технический рецепт* (!) возможного в ближайшее десятилетие решения проблем экологии (и не только) – повышение энергоэффективности существующего оборудования. Всё последующее изложение посвящено этой идее. Может показаться, что автор ломится в открытую дверь, однако по имеющейся у автора информации, по крайней мере в области холодильной техники, более 80% (!) научно-технических статей международного журнала (International Journal of Refrigeration) за 2014–2019 гг. (было просмотрено 1569 статей) [2–3] не содержат убедительных доказательств в адекватности предлагаемых моделей тепло- и массообмена в холодильном оборудовании. Поэтому трудно говорить об эффективности технических и технологических решений, предлагаемых проектными и консалтинговыми компаниями.

Итак, более эффективное использование энергетических ресурсов снижает выбросы парниковых газов, снижает стоимость товаров и услуг, создает рабочие места и обеспечивает экономическую стабильность, смягчая скачки цен на энергоносители, вызванные неустойчивой политической ситуацией в странах – экспортёрах нефти.

Исследование ACEEE (Американский совет по энергоэффективной экономике) [4] показало значительный рост роли энергоэффективности в электроэнергетике – сегодня это третий по величине источник электроэнергии в Соединенных Штатах, дающий больше энергии, чем ядерная энергия. Но это не только один из самых распространенных ресурсов, но и, как правило, самый дешевый способ удовлетворить потребности клиентов в энергии. Данные Lazard о приведенной стоимости ресурсов электроснабжения, опубликованные в ноябре 2017 года, подтверждают, что помогая клиентам устанавливать эффективные приборы, теплоизолировать свои дома и здания, совершенствовать методы эксплуатации и технического обслуживания, коммунальные предприятия инвестируют в самые дешевые энергоресурсы.

Инвестиции в повышение энергоэффективности, направленные на снижение стоимости энергозатрат коммунальных предприятий, составляют два-пять центов за киловатт-час (в среднем около трех центов), при этом производство такого же количества электроэнергии из таких источников, как ископаемое топливо, может стоить в два-три раза дороже. Неудивительно, что энергоэффективность продолжает оставаться самым дешевым ресурсом. Исследование ACEEE [4] также показало, что даже среди коммунальных предприятий, достигших наивысшего уровня экономии электроэнергии за счет эффективности, стоимость сэкономленной энергии остается неизменно низкой. Аналогичные результаты были получены в Национальной лаборатории Лоуренса Беркли (LBNL).

Инвестиции в энергоэффективность могут иметь большой эффект. Фактически инвестиции в энергоэффективность, сделанные в период с 1990 г. по сегодняшний день, помогли США избежать строительства эквивалента 313 крупных электростанций и принесли потребителям по всей стране совокупную экономию почти 790 млрд долл. [4]. Энергоэффективность имеет и множество других преимуществ: чистота, легкодоступность и надежность, поможет повысить комфорт в домах и офисах, стимулировать экономическое развитие в городах и поселках. Коммунальные предприятия, инвестирующие в энергоэффективность, делают это, потому что это выгодно с финансовой точки зрения для них, но выгоды получают все.

Последние десять лет ACEEE составляет рейтинги крупнейших экономик мира [5]. ACEEE выделила четыре группы: те, которые отслеживают сквозные аспекты использования энергии на национальном уровне, а также три сектора, в первую очередь отвечающие за потребление энергии в экономически развитой стране, – здания, промышленность и транспорт. Хотя многие страны добились заметных успехов, ни одна из них не получила высший балл ни в одной из категорий, а это доказывает, что все страны могут многому научиться друг у друга. Великобритания и Германия заняли первое место в новом рейтинге энергоэффективности. Например, Соединенные Штаты получили относительно высокие оценки по строительству, но оказались в конце списка по транспорту.

Как Израиль может конкурировать в мировой экономике, если он продолжает тратить впустую деньги и энергию, которые другие промышленно развитые страны сохраняют и могут реинвестировать? Сделать наши здания и предприятия более энергоэффективными — это серьезная задача, для решения которой потребуются годы; сделать это экономически эффективно будет означать использование опыта других.

К сожалению, нынешняя ситуация не внушает оптимизма [1].

- Удельное энергопотребление крупных корпоративных зданий в Израиле на квадратный метр на 50–80% выше, чем в среднем по Израилю. Кто платит? – мы, клиенты.
- Существующий тариф на электроэнергию, установленный Управлением электроэнергетики, не стимулирует граждан экономить энергию! В целом максимально возможная величина накопительного платежа при переводе одного киловатта электроэнергии с часов «пик» и «средней нагрузки» на часы по «низкому тарифу» равна: в 2012 г. – 300; в 2017 году – 270, а в 2021 – 230 долл. США. Реально возможная экономия платежа для каждого потребителя будет меньше 90–110 долл. США/кВт в год. Для сравнения: в Австралии, Калифорнии, Кипре структура тарифа на электроэнергию поддерживает потребительскую

процентную ставку по экономии энергии. Например, для небольшой системы хранения льда (20 т охлаждения = 70 кВт мощности охлаждения, объем накопительного бака 20 м³) система кондиционирования воздуха супермаркета (Олимпик, Никосия) на Кипре имеет срок окупаемости инвестиций менее 3 лет!

- Коэффициент нагрузки (load coefficient), запланированный правительством Израиля, к 2030 г. составит около 0,535–0,559 по сравнению с уже фактическим коэффициентом нагрузки в Англии, равным 0,72.

Повышению энергоэффективности нашей промышленности во многом мешает бюрократия. Нужны воля и решимость исправить ситуацию. Это позволит стране сэкономить десятки миллиардов долларов в ближайшие 2–5 лет.

В ближайшие годы необходимо сосредоточиться на повышении эффективности теплоизоляционного и отопительно-холодильного оборудования, разработке качественных оконных и герметичных конструкций, воздухопроводов, снижении энергопотребления на освещение и бытовую технику.

СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ХОЛОДА: «ЗА» И «ПРОТИВ»

Одним из возможных и целесообразных направлений повышения энергоэффективности оборудования является использование систем накопления холода (СНХ). СНХ могут быть быстро применены для реализации мер по охране окружающей среды. Концепция СНХ направлена на снижение пиковой нагрузки кондиционирования воздуха в дневные часы, когда тарифы на электроэнергию самые высокие, за счёт большего потребления в течение ночных часов, когда тариф на электроэнергию самый низкий и коэффициент полезного действия холодильного оборудования высокий. СНХ позволит улучшить электросистемы, потребовав меньше генерирующих установок и снизив потребность в строительстве новых станций и распределительных систем. СНХ также улучшит отказоустойчивость сети, если в сеть подается слишком много нестабильных возобновляемых источников энергии.

К сожалению, примерно с 1950 г. СНХ, уделялось мало внимания. Согласно глобальной базе данных Министерства энергетики США по хранению энергии, на сегодняшний день во всем мире находятся в эксплуатации или строятся 166 проектов по хранению холода, с общей мощностью 3365 МВт [1]. Однако большинство из этих проектов представляют собой хранение тепла посредством расплавленной соли для концентрированных солнечных электростанций (всего 2 552 МВт) и хранение охлажденной воды или бинарного льда (БЛ) для управления потреблением электроэнергии со стороны спроса (200 МВт). Аккумулирование тепла

не рассматривалось многими коммунальными предприятиями при планировании ещё недавно, в 2015 г. Только в последние годы потенциальная ценность СНХ получила широкое признание благодаря гораздо более высокой плотности эксергии и возможности когенерации холода и тепла.

Необходимо подчеркнуть, что хранение холодной энергии позволяет отказаться от ископаемого топлива, что приводит к снижению потребления первичной энергии примерно на 30–50%. Развертывание таких систем значительно снижает потребление ископаемого топлива и выбросы парниковых газов, что в конечном итоге может помочь смягчить растущее загрязнение атмосферы. Накопленная энергия может быть использована для обогрева и охлаждения, что обеспечивает более высокую надежность, повышенную общую эффективность и снижение капиталовложений и эксплуатационных расходов. На системы кондиционирования воздуха (АС) приходится от 16 до 50% потребления электроэнергии во многих регионах мира, особенно в жарких и влажных странах вблизи экватора. Технология аккумулирования холодной энергии более эффективна, чем традиционные децентрализованные системы кондиционирования воздуха, и может сократить потребление электроэнергии во время пикового спроса за счет снижения энергопотребления. Следовательно, увеличение инвестиций в такие технологии будет способствовать развитию рынка в ближайшие годы.

Размер мирового рынка хранения холодной энергии оценивался в 227,9 млн долл. США в 2020 г. [6]. Прогнозируется, что мировой рынок вырастет с 244,7 млн долл. США в 2021 году до 616,6 млн долл. США в 2028 г. при среднегодовом темпе роста 14,1% в течение прогнозируемого периода. Глобальное воздействие COVID-19 было ошеломляющим и беспрецедентным, поскольку во время пандемии на рынке холодной энергии наблюдался отрицательный спрос в регионах. Мировой рынок показывает медленный рост на уровне 6,6% в 2020 г. по сравнению со средним годовым ростом в 2017–2019 годах. Увеличение среднегодового темпа роста объясняется спросом на этом рынке и тем, что рост возвращается к допандемическим уровням.

Замечательные разработки в области систем хранения энергии и последующее снижение воздействия этих систем на окружающую среду стимулируют спрос на эти системы во всем мире.

Технологии СНХ можно разделить на два основных направления [7, 8]: хранение энергии при изменении фазы (системы со скрытой теплотой), хранение энергии в виде изменения температуры (системы явного тепла).

В большинстве систем СНХ со скрытой теплотой в качестве среды используется БЛ, хотя зачастую применяется другой материал с фазовым переходом (МФП). Основными преимуществами являются высокая плотность (малый объем на хранимую энергию, кВт·ч)

и модульность, к недостаткам можно отнести сложность, необходимость передачи холода для зарядки и разрядки СНХ, высокое энергопотребление из-за работы низкотемпературного чиллера и небольшую экономическую выгоду. Конструкции СНХ со скрытой теплотой могут быть реализованы в виде: СНХ для накопления льда (чешуйчатого, кубикового, трубчатого и т.д.), СНХ с внешним таянием льда на эмеевике в накопительном танке, СНХ с капсулами, содержащими лёд, СНХ с БЛ или суспензией парафинового воска, СНХ с эвтектическими солями или двуокисью углерода.

В большинстве систем СНХ с явным теплом в качестве среды хранения используется не только вода, но и другие низкотемпературные жидкости. Основными преимуществами являются простота, энергоэффективность и высокая экономия за счет масштаба, а к недостаткам относятся низкая плотность энергии (большой объем на хранимые кВт·ч). СНХ с охлажденной водой имеет множество конфигураций с различными средствами для поддержания необходимого разделения между холодной подаваемой водой и теплой обратной водой. К СНХ явного тепла относятся: метод с пустым резервуаром, лабиринтный резервуар, перегородка и водослив, мембранное или диафрагменное разделение, термическая стратификация, водный раствор нитрита/нитрата натрия.

Перечислим преимущества и недостатки СНХ.

«За». Положительными сторонами СНХ можно считать:

- способствуют эффективному использованию нестабильных возобновляемых источников энергии;
- могут быть объединены в единую интеллектуальную энергетическую систему;
- снижают потребность в увеличении пиковой генерирующей мощности;
- повышают надежность сети;
- постоянно улучшаются производительность и экономические показатели;
- позволяют интегрировать возобновляемые и ископаемые источники.

«Против». Факторы, препятствующие внедрению СНХ:

- энергия теряется из-за неэффективности цикла «зарядка и разрядка»;
- дополнительные материальные затраты и усложнение работы с энергетической системой;
- дополнительные требования к инфраструктуре и пространству.

Несмотря на многочисленные экспериментальные и численные исследования характеристик СНХ, их промышленно-технические параметры остаются неудовлетворительными [9]. Не существует надежной, хорошо проверенной и принятой методологии расчета параметров или изучения возможности использования СНХ, методы, предлагаемые в научных статьях,

еще далеки от реального промышленного применения, алгоритмы, разработанные частными фирмами-производителями СНХ, являются конфиденциальными и поэтому неизвестны общественности. Кроме того, не существует общепринятых рекомендаций по расчету общего КПД для СНХ. Несмотря на то что существует «Протокол единообразного измерения и выражения производительности систем накопления энергии» [10], он не используется в научных исследованиях. В настоящее время подавляющее большинство производителей, которых в мире насчитывается более 300 [11], не предоставляют достаточной технической информации для понимания реальных преимуществ и недостатков СНХ, что не позволяет провести объективное сравнение конкретных показателей СНХ. Компании используют разные технологии для производства своих панелей, а также разные средства для тестирования и проверки своих заявлений.

Все вышеизложенное подтверждает необходимость разработки единой методики расчета эффективности СНХ. На рынке СНХ возникла ситуация, мешающая потенциальным покупателям получить достоверную техническую информацию для выбора предпочтительного метода, технологии и конструкции СНХ.

Мировой рынок хранения низкотемпературной энергии значительно фрагментирован, на нем действуют разные ключевые игроки на национальном, региональном и глобальном уровнях. Участники отрасли уделяют значительное внимание разработке высокопроизводительных систем хранения тепла с улучшенными эксплуатационными характеристиками, чтобы укрепить свои позиции на мировом рынке. Принимая во внимание все сценарии, с точки зрения автора, EVAPCO, Inc., Baltimore Aircoil Company и Omega Thermo Products занимают значительную долю мирового рынка благодаря своим более производительным устройствам хранения и налаженной цепочке поставок. Ожидается, что они останутся лидерами рынка в ближайшие годы.

К основным игрокам на рынке СНХ следует отнести: CALMAC (Великобритания); Baltimore Aircoil Company (США); Vogt Ice LLC (США); Nostromo Energy (Израиль); BeKa Heiz- und Kühlmatten GmbH (Германия); Trane (Ирландия); Viking Cold Solutions, Inc. (США); NETenergy (США); EVAPCO, Inc. (США); EnergiVault (Великобритания); Omega Thermo Products (США); Fullwood Packo Group (Великобритания); Kilkenny Cooling Systems (Ирландия).

Крупнейшая система хранения тепловой энергии на основе водяного охлаждения установлена в Медицинском центре Техаса, США. Резервуар имеет вместимость 34 000 м³, высоту 46 м и диаметр 34 м. Штат Техас установил тарифы 5 центов за киловатт-час в ночные часы (низкий тариф) и 3 доллара за киловатт-час в часы пик: разница в 60 раз!

К последним разработкам в этой области можно отнести [6] следующие.

В августе 2021 г. Emirates Central Cooling Systems Corporation (Empower) объявила о заключении контракта на поставку 3 700 т охлаждения (RT) централизованного охлаждения для Marsa Al Arab, одного из самых значительных направлений морского туризма и отдыха, разрабатываемых на Джумейре, Дубай. По данным компании, первый этап предоставления услуг централизованного холодоснабжения начался в конце 2021 г. Проект Marsa Al Arab стоимостью 6 млрд дирхамов (1,63 млрд долл. США) состоит из двух искусственных островов, расположенных по обеим сторонам отеля Burj Al Arab на общей площади 370 000 м².

В июле 2021 г. компания Baltimore Aircoil (BAC) объявила о приобретении итальянской компании Eurocoil SPA, ведущего производителя теплообменников, обслуживающих европейскую коммерческую и холодильную промышленность. Добавление Eurocoil увеличивает производственные мощности Baltimore Aircoil в регионе, добавляя дополнительные возможности при производстве теплообменников, используемых для существующих продуктов испарительного гибридного и адиабатического охлаждения BAC.

СНХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛ

По мнению автора, наиболее перспективной технологией для СНХ является использование БЛ.

Давно предложены различные конструкции СНХ, использующие БЛ, поскольку потенциальные выгоды от уменьшения размеров труб и насосов, а также мощности насоса весьма значительны. Были предприняты различные попытки, в том числе Liquid Ice от CB&I в конце 1970-х – начале 1980-х годов, Slippery Ice от EPRI в конце 1980-х годов, в двух из которых использовались теплообменники с падающей пленкой на электрополированные трубки из нержавеющей стали и сложной поверхности теплопередающих устройств, а также с применением скребков для очистки внутренней поверхности льдогенераторов (в Канаде); однако ограничения теплового потока и высокая удельная стоимость остановили дальнейшее развитие. Следует отметить, что система, работающая в тройной точке воды (с тремя фазами: твердой, жидкой и паровой в равновесии), была разработана IDF Technologies в Израиле в 1970-х годах и имеет преимущество прямого контакта между хладагентом (вода-пар) и смесью вода-лед, работающей при 0 °C при глубоком вакууме. Этот метод время от времени находил применение при охлаждении очень глубоких золотых приисков в Южной Африке, в качестве теплового насоса для централизованного теплоснабжения в Скандинавии и в качестве средства производства льда в теплую погоду на горнолыжных курортах (Сочи). Но из-за проблем с закупоркой в реальных трубопроводных системах перекачка БЛ по-прежнему остается в значительной степени нереализованным «Святым Граалем».

Вместе с тем, в настоящее время существует несколько международных компаний, таких как Sunwell (Канада), Paul Muller (США), Ziegler (Германия), которые продают крупные СНХ на базе ПЛШ. Эти агрегаты установлены в разных странах: Японии, Кореи, США, Великобритании, Турции, Австралии.

Только после разработки *ледогенераторов с очищаемой поверхностью* в Израиле в 1999 г. на заводе «Тулгал», кибуц Дегания А, недалеко от Галилейского моря (расчетная максимальная холодопроизводительность этой СНХ составляет 280 кВт, недельная запасенная энергия холода – 30 000 кВт·ч.) стало очевидным, что технология БЛ является ключом к снижению себестоимости и серьезному повышению коэффициента тепломассообмена при строительстве СНХ. Основной целью БЛ является производство охлаждающей среды с такой же вязкостью, как у воды, и охлаждающей способностью, как у льда.

СНХ с использованием БЛ включает следующие основные компоненты: ледогенератор(ы) с компрессорно-конденсаторными агрегатами (или низкотемпературный чиллер), резервуар(ы), теплообменник, трубопроводы, насосы, электрические и электронные приборы и устройства. Поскольку СНХ на основе холодной воды требует огромной площади и объема для ее установки (очень низкая концентрация энергии в объеме резервуара-аккумулятора – около 9,5 кВт·ч/м³), а СНХ с материалами с фазовым переходом вызывает потенциальные проблемы с безопасностью, сосредоточимся на преимуществах СНХ на основе БЛ по сравнению с СНХ, использующими другие виды льда [1].

- В настоящее время по технологии БЛ может производиться 1000 кг/ч чистого льда при энергозатратах 60–75 вместо 90–130 кВт·ч, необходимых для производства обычного льда (пластинчатого, чешуйчатого, ракушечного); дальнейшие усовершенствования позволяют достичь удельных энергозатрат на производство льда 40–55 кВт·ч/1000 кг чистого льда и производительности по льду на величину охлаждающей поверхности 500 кг/(ч·м²).
- Кристаллизатор (испаритель) может работать с коэффициентом полезного действия (КПД), приблизительно равным КПД чиллера, работающего в часы пиковых высоких температур воздуха (температура кипения х/а –9 °С, температура воздуха +32 °С, температура конденсации +24 °С, водяной конденсатор по сравнению с температурой кипения х/а +3°С, температура воздуха +45 °С, температура конденсации – +37 °С, водяной конденсатор).
- Во всех существующих типах СНХ (статические и динамические системы хранения льда) общий коэффициент теплопередачи между кипящим хладагентом в испарителе и водой/льдом в аккумулирующей емкости очень низок из-за наличия разного рода термических сопротивлений, таких как «хладагент –

стенка испарителя», «толщина стенки испарителя», «контакт стенки испарителя – раствор пропиленгликоля» и др. Простые расчеты показывают, что общий коэффициент теплопередачи (КТП) при производстве перекачиваемого льда более чем в десять раз выше (эффективнее), чем аналогичный коэффициент для вышеперечисленных типов СНХ. Например, КТП от хладагента к охлажденной жидкости в СНХ на основе БЛ составляет 750–1250 Вт/(м²·К), по сравнению с 10–80 Вт/(м²·К) для статических систем хранения льда. Чтобы компенсировать неудовлетворительную теплопередачу, ведущим компаниям, таким как производители динамических и статических систем хранения льда, приходится увеличить поверхность теплопередачи испарителей и количество пластин или змеевиков, а также выбирать относительно большие по мощности холодильные компрессоры. Это, в свою очередь, приводит к увеличению объема комплектующих, снижению максимально достижимой концентрации льда в объеме резервуара (не более 50%), что в итоге сказывается на цене оборудования. Так, например, комбинацию высокопроизводительных компрессоров Trane с баками с очень низким КТП (конструкция танков фирмы CALMAC) можно сравнить с привязкой автомобиля Rolls-Royce к телеге.

- Немаловажным фактором для успешного применения СНХ с БЛ является разработка усовершенствованных конструкций аккумуляторов низкотемпературной энергии – накопительных танков. Каковы недостатки существующих резервуаров? Хаотичный неконтролируемый подъем торосов, образующихся из-за неравномерного выброса теплого раствора, который поступает из теплообменника и подается в резервуар для хранения льда для дальнейшего охлаждения за счет прямого контакта с поверхностью льда. Из-за неравномерности в пространстве и времени скорости подачи раствора лед тает неравномерно, ледяные шипы возвышаются над поверхностью льда, что приводит к разрушению распылительных устройств и необходимости снижения уровня раствора в баке во избежание поломок. Накопившийся в резервуаре лед превращается в большой айсберг. Теплая жидкость, поступающая из системы кондиционирования, создаёт каналы, по которым жидкость может возвращаться в систему без охлаждения. В результате низкотемпературная энергия накопленного льда не будет использована полностью. Неэффективное использование объема накопительной емкости приводит к снижению максимально достижимой концентрации льда и невозможности заполнения всего рабочего объема накопительной емкости.
- Совместными усилиями многих ученых, инженеров и конструкторов были созданы простые и относи-

тельно дешевые накопительные емкости (пластмассовые, горизонтальные цилиндрические, длиной 5–8 м), позволяющие накопить лёд в объеме 90% танка.

Все вышеизложенное подтверждает, что БЛ имеет следующие преимущества по сравнению с существующими СНХ на обычном льду [1]:

- а) сокращение первоначальных инвестиций: снижение холодопроизводительности на 30–40%, уменьшение объема баков и теплообменников на 30%;
- б) снижение эксплуатационных расходов: потребление электроэнергии для производства того же количества чистого льда на 30–70% меньше;
- в) лучшая перекачка (меньшее потребление энергии) холодоносителя между системой кондиционирования и аккумулирующими элементами.

Объективный анализ целесообразности использования аккумулирующей системы требует учета множества факторов, в том числе ожиданий заказчика в отношении конструкции, холодопроизводительности и цен на оборудование, профиля дневной тепловой нагрузки, существующего тарифа на электроэнергию, запаса холодной энергии на неделю, горизонт планирования, потребление энергии в неделю и т.д. Принимая во внимание вышеперечисленные факторы, можно предложить сравнение окупаемости СНХ, включающей в себя обычные чиллеры с льдогенераторами БЛ, накопительными баками, пластинчатыми теплообменниками, насосами, необходимым электрооборудованием, комплектующими и альтернативный вариант обычной центральной системы кондиционирования.

Для оценки экономической эффективности и срока окупаемости СНХ на основе БЛ использовалась стандартная методология. Для удовлетворения ожиданий клиентов в отношении конструкции, холодопроизводительности и цен на оборудование была разработана программа моделирования режима работы, которая рассматривает несколько вариантов, в том числе ежедневный профиль тепловой нагрузки, существующий тариф на электроэнергию Израильской электрической компании и величину накопленной энергии для горизонта планирования в течение одной недели.

Программа рассчитывает количество потребляемой энергии и стоимость электроэнергии для различных типов охлаждающего оборудования, включая СНХ с холодной водой с обычным чиллером, а также динамическим или статичным хранилищем льда в СНХ. Программа может собирать данные о любых СНХ, работающих непрерывно в течение 365 дней в году, 7 дней в неделю и 24 часа в сутки. Режим работы СНХ может быть изменен в соответствии с требованиями клиента.

Для каждого сезона программа способна рассчитать оптимальную мощность по производительности льда, минимальное количество необходимых льдогенераторов БЛ и резервуаров для хранения, с учётом тарифов.

Программа предлагает варианты оплаты энергии в зависимости от сезона и возможностей клиентов. Клиент может подобрать оптимальный вариант, например выбрать производительную модель льдогенератора БЛ с большим количеством требуемых испарителей и резервуаров для хранения льда. Программа обеспечивает сравнение рентабельности инвестиций для СНХ, включающей обычные чиллеры (по сравнению с БЛ), и для альтернативной версии обычной центральной системы кондиционирования воздуха или другого типа СНХ.

Например [1], для стандартной системы кондиционирования воздуха израильской фармацевтической компании холодопроизводительностью 3 900 кВт, годовое потребление электроэнергии составляет 4 530 000 кВт·ч, стоимостью 537 000 долл. США. Если в дополнительной СНХ на БЛ используются существующие фирменные чиллеры, способные работать при температуре хладагента -9°C холодопроизводительностью 1 050 кВт, а общая эквивалентная холодопроизводительность составляет 3 870 кВт, то цена СНХ с использованием технологии БЛ составляет 353 000 долл. США. Годовое потребление электроэнергии на всю модифицированную установку составляет 4 040 000 кВт·ч, а ее стоимость – 417 000 долл. США. В этом случае система БЛ в сочетании с существующей системой кондиционирования фармкомпания позволяет выйти на окупаемость в течение 3 лет.

Вышеуказанные причины объясняют быстрое распространение СНХ на основе БЛ за рубежом, но не в Израиле. Причины ограниченного использования СНХ в Израиле следующие.

- Текущая техническая поддержка поставщиков СНХ оставляет желать лучшего, разработчики систем кондиционирования стараются не решать эту проблему. Такая же ситуация присутствует на этапе как проектирования, так и ввода в эксплуатацию.
- Местные техники не знают, как управлять и настраивать СНХ с БЛ. Иногда могут потребоваться месяцы или даже годы, чтобы привести СНХ к оптимальным условиям работы.
- Стоимость продукта является ключевым аргументом при принятии любого решения. Если первоначальные капитальные затраты выше ожидаемых, то качество и долгосрочная экономия средств игнорируются.
- Для проектирования или установки системы кондиционирования не требуется разрешение (сертификация), что приводит к непрофессионализму проектировщиков.
- Известная рентабельность инвестиций в течение 5–7 лет выходит за рамки горизонта обычного израильского менеджера.
- Низкий балл по шкале LEED (Leadership in Energy and Environmental Design).

- Отсутствие государственного контроля за проектированием систем кондиционирования воздуха.
- Длительный процесс продажи, который включает, как минимум, четыре этапа (технический руководитель – владелец – инженерная компания по проектированию системы кондиционирования – генеральный подрядчик) и сдачу технического обследования. Каждый этап является затратным и имеет множество предпосылок для задержки проектирования.
- При существующих тарифах на электроэнергию и климатических условиях Израиля, СНХ с технологией БЛ рекомендуется для существующих систем центрального кондиционирования холодопроизводительностью не менее 1000...1700 кВт.

ВЫВОДЫ

Внедрение СНХ может помочь в снижении спроса на электроэнергию за счет накопления потенциала холода/тепла в часы с низким тарифом для компенсации неравномерных тепловых нагрузок.

Использование СНХ, реализующей технологию би-нарного льда и улучшенные конструкции резервуаров для хранения, может помочь снизить стоимость потребляемой электроэнергии.

Применение СНХ на основе БЛ с модернизированными центральными системами кондиционирования воздуха экономически оправдано для предприятий и зданий в странах с жарким климатом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Menin B.M. Wind turbines and photovoltaic panels: not so fast. What can be done? *Electricity and People*. 2018. Vol. 72, N 5. P. 30–35.
2. Menin B. Uncertainty Estimation of Refrigeration Equipment Using the Information Approach // *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 2020. Vol. 8, N 1. P. 23–37. Режим доступа: <https://www.scirp.org/journal/Paperabs.aspx?PaperID=97483>
3. Menin B. Amount of Information and Measurement Uncertainty // *Physical Science International Journal*. 2020. Vol. 24, N 3. P. 1–8. Режим доступа: <http://www.journalpsij.com/index.php/PSIJ/article/view/30179/56622>
4. Renewables are Getting Cheaper but Energy Efficiency, on Average, Still Costs Utilities Less // *ACEEE report*. 2018. December, 18. Режим доступа: <https://www.aceee.org/blog/2018/12/renewables-are-gettingcheaper-energy>
5. Countries' Limited Energy-Saving Efforts Need Rapid Scaling to Meet Climate Crisis // *ACEEE Report*. Режим доступа: <https://www.aceee.org/pressrelease/2022/04/countries-limited-energy-saving-efforts-needrapid-scaling-meet-climate>
6. The global cold thermal energy storage market is projected to grow from USD 244.7 million in 2021 to USD 616.6 million in 2028 at a CAGR of 14.1% // *Fortune Business Insights*, Report ID: FBI106279. Режим доступа: <https://www.fortunebusinessinsights.com/cold-thermal-energy-storage-market-106279>
7. Torcellini P., MacCracken M., Narayanamurthy R., et al. Roundtable: energy storage: helping move toward a sustainable future // *ASHRAE Journal*. 2021. Vol. 63, N. 7. P. 1–9.
8. Thermal energy storage systems // *46th Informatory Note on Refrigeration Technologies, IIR*. 2022. Vol. 1. P. 1–16. Режим доступа: <https://iifiir.org/en/documents/46150/download>
9. Menin B. Preferred physical-mathematical model of the cold energy storage system // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 112. P. 1020–1026. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.128
10. Conover D., Crawford A.J., Fuller J. et al. Protocol for Uniformly Measuring and Expressing the Performance of Energy Storage Systems. Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico, Department of Energy, 2016. Режим доступа: <https://energystorage.pnnl.gov/pdf/PNNL-22010Rev2.pdf>
11. AHRI Members, Web. Режим доступа: <http://goo.gl/HSwxfu>

REFERENCES

1. Menin B.M. Wind turbines and photovoltaic panels: not so fast. What can be done? *Electricity and People*. 2018;72(5):30–35.
2. Menin B. Uncertainty Estimation of Refrigeration Equipment Using the Information Approach. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 2020;8(1):23–37. Available from: <https://www.scirp.org/journal/Paperabs.aspx?PaperID=97483>.
3. Menin B. Amount of Information and Measurement Uncertainty. *Physical Science International Journal*. 2020;24(3):1–8. 2020. Available from: <http://www.journalpsij.com/index.php/PSIJ/article/view/30179/56622>
4. Renewables are Getting Cheaper but Energy Efficiency, on Average, Still Costs Utilities Less. *ACEEE report*. 2018. December, 18. Available from: <https://www.aceee.org/blog/2018/12/renewables-are-gettingcheaper-energy>.
5. Countries' Limited Energy-Saving Efforts Need Rapid Scaling to Meet Climate Crisis. *ACEEE report*. Available from: <https://www.aceee.org/pressrelease/2022/04/countries-limited-energy-saving-efforts-needrapid-scaling-meet-climate>
6. The global cold thermal energy storage market is projected to grow from USD 244.7 million in 2021 to USD 616.6 million in 2028 at a CAGR of 14.1%. *Fortune business insights*, report ID: FBI106279. Available from: <https://www.fortunebusinessinsights.com/cold-thermal-energy-storage-market-106279>.
7. Torcellini P, MacCracken M, Narayanamurthy R, et al. Roundtable: energy storage: helping move toward a sustainable future. *ASHRAE Journal*. 2021;7:1–9.
8. Thermal energy storage systems. *46th Informatory Note on Refrigeration Technologies, IIR*. 2022;1:1–16. Available from: <https://iifiir.org/en/documents/46150/download>
9. Menin B. Preferred physical-mathematical model of the cold energy storage system. *Applied Thermal Engineering*. 2017;112:1020–1026. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.128

10. Conover D, Crawford AJ, Fuller J, et al. Protocol for Uniformly Measuring and Expressing the Performance of Energy Storage Systems. Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico, Department of Energy, 2016. Available from: <https://energystorage.pnnl.gov/pdf/PNNL-22010Rev2.pdf>

11. AHRI Members, Web. Available from: <http://goo.gl/HSwxfu>

ОБ АВТОРЕ

Борис Михайлович Менин. к.т.н.,
консультационный эксперт по холодильному оборудованию;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8298-5944>;
e-mail: meninbm@gmail.com

AUTHORS' INFO

Boris M. Menin, Cand. Sci. (Tech.),
Refrigeration Consultant,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8298-5944>;
e-mail: meninbm@gmail.com