

УДК 62-711

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-58-70

## Оценка масштабов и перспектив использования холода окружающей среды для экономии энергии

А.Б. Гаряев, Ю.В. Коротке

Проведены исследования возможности и эффективности полезного использования холода окружающей среды в Российской Федерации в различных сферах деятельности, проанализирована текущая мировая ситуация по данному направлению энергосбережения. Выделены наиболее перспективные направления, для каждого из которых оценена экономия энергоресурсов за счет естественного охлаждения (фрикулинга).

Рассмотрено полезное использование природного холода для сжижения природного газа, охлаждения воздуха на входе в компрессор газотурбинных установок, молока в пищевой промышленности и систем термостабилизации центров обработки данных. Для каждого из направлений выполнен литературный обзор проведенных исследований и разработанных проектов. Даны оценки не только положительных аспектов использования естественного охлаждения, но и выделены возможные проблемы и сложности внедрения фрикулинга. Для нефтегазовой промышленности и энергетики проведена оценка эффективного использования натурального холода в уже существующих и эксплуатируемых системах охлаждения. Даны ответы на вопрос о целесообразности полезного использования фрикулинга в данных сферах.

Проанализированы способы охлаждения оборудования дата-центров с использованием различных проектных решений. Разработаны схемы, обеспечивающие рассмотренные способы охлаждения. Проведены расчеты энергопотребления при холодоснабжении или подогреве воздуха в различных климатических зонах России. Вычислена экономия энергоресурсов за счет свободного охлаждения в разные периоды года и сделаны выводы об эффективности и целесообразности подобного решения.

Представлена схема охлаждения молочного комбината, расположенного в средней полосе России. Создана расчетная имитационная модель физического процесса охлаждения в программной среде Simulink Matlab. Рассчитаны энергозатраты системы охлаждения и соответствующие экономические затраты в схеме. Изучены достоинства и недостатки схемы с технической и экономической сторон вопроса. Выделены возможные варианты модернизации расчетной системы охлаждения завода, способствующие росту экономии электроэнергии при эксплуатации схемы.

*Ключевые слова:* холод окружающей среды, естественное охлаждение, фрикулинг, энергосбережение.

*Для цитирования:* Гаряев А.Б., Коротке Ю.В. Оценка масштабов и перспектив использования холода окружающей среды для экономии энергии // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 58—70. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-58-70.

## Assessing the Scales and Prospects of Using the Environmental Cold for Energy Saving Purposes

А.В. Garyaev, Yu. V. Korotke

The possibilities and efficiency of usefully utilizing the environmental cold in the Russian Federation in different fields of activity are investigated, and the current state of things existing around world in this energy saving area is analyzed. The most promising fields are highlighted, and the saving of energy resources due to natural cooling (known as free cooling) is estimated for each of them.

Useful utilization of natural cold for liquefying natural gas, for cooling air at the compressor inlet of gas turbine units, for cooling milk in the food industry, and for data center thermal stabilization systems is considered. Information about the performed investigations and developed projects published in the literature is reviewed for each of these application fields. Along with the positive aspects of using natural cooling, possible problems and difficulties associated with practical use of free cooling are pointed out.

The possibilities of efficiently using natural cold in existing and operating cooling systems are evaluated for the oil-and-gas and power industries. Answers to the question about the advisability of usefully utilizing free cooling in these fields are given.

Methods for cooling data center equipment with the use of different design solutions are analyzed. Process arrangements embodying the considered cooling methods are elaborated. Calculations of energy consumption for cooling or heating air in different climatic zones of Russia are carried out. The saving of energy resources due to the use of free cooling in different periods of the year is quantitatively estimated, and conclusions about the effectiveness and expediency of such a solution are drawn.

The cooling system process arrangement for a dairy factory located in the middle part of Russia is presented. A simulation analysis model of the physical cooling process is developed in the Matlab Simulink software environment. The energy expenditures of the cooling system and the corresponding economic costs in the cooling process arrangement are quantitatively estimated. The advantages and drawbacks of the arrangement are analyzed from the technical and economic points of view. Possible versions for upgrading the factory's design cooling system contributing to increased savings of electricity during the process system operation are pointed out.

*Key words:* environmental cold, natural cooling, free cooling, energy saving.

*For citation:* Garyaev A. B., Korotke Yu. V. Assessing the Scales and Prospects of Using the Environmental Cold for Energy Saving Purposes. MPEI Vestnik. 2018;4:58—70. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-58-70.

## Введение

Значительную часть всех энергопотребляющих систем составляют системы охлаждения. В энергетических балансах развитых стран расход электроэнергии на холодильное оборудование составляет 15...20 % [1]. На основе мирового потребления электроэнергии это позволяет приблизительно оценить общие затраты на производство искусственного холода в 0,95...1,1 млрд т.у.т., что близко к общему потреблению энергии в Российской Федерации. В настоящее время в нашей стране действует порядка 300 тыс. предприятий и организаций, связанных с производством, эксплуатацией, обслуживанием и проектированием холодильных систем [2].

В настоящее время внимание энергетиков разных стран во многом обращено на нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. На использование природного холода обычно обращают меньше внимания, что совершенно незаслуженно.

Климатические условия России являются одними из самых холодных в мире. Этот вывод можно сделать, сравнив число градусо-суток отопительного периода (ГСОП) (произведение разности температуры внутреннего воздуха и средней температуры наружного воздуха за отопительный период на продолжительность отопительного периода) городов России и других северных стран (табл. 1).

Более низкие температуры окружающего воздуха требуют больших затрат на отопление и вентиляцию зданий, однако дают существенное снижение потребления энергоресурсов при работе систем холодоснабжения, кондиционирования и охлаждения энергетических установок как, например, при охлаждении конденсаторов паровых турбин или подаче холодного воздуха в компрессор газотурбинных установок.

Природное расположение России дает большие возможности для использования естественного холода, особенно в районах с континентальным климатом, где наблюдается большая разница летних и зимних темпе-

ратур. Тем не менее, его использование имеет гораздо меньшие масштабы по сравнению с западными странами с более мягким климатом [3].

Одна из причин медленного роста использования естественного холода в России — относительно низкая стоимость энергетических ресурсов на внутреннем рынке. Недостаточность внедрения естественного охлаждения в существующие системы холодоснабжения во многом объясняется удобством использования традиционных (парокомпрессионных) холодильных машин. Любое усложнение системы охлаждения ведет к необходимости дополнительного расчета и настройки режимов ее работы, применения более сложных систем автоматики, наличия квалифицированного персонала и т. д. Кроме того, недостаточно проработаны и встроены типовые схемы для использования естественного холода и недостаточен опыт их применения, что не позволяет определить их надежность, затраты на изменение систем и получаемый экономический эффект.

Цель работы — анализ результатов исследований, практики и масштабов применения естественного холода, а также оценка возможности экономии энергии за счет его использования в некоторых областях хозяйственной деятельности.

## Современное состояние исследований и практики использования естественного холода

Все системы холодоснабжения можно разделить на три группы (рис. 1).

Анализ литературных источников показал, что основными направлениями научных исследований в области естественного охлаждения на сегодняшний день являются:

— разработка энергосберегающих схем, позволяющих сократить потребление электроэнергии путем снижения нагрузки с холодильных машин за счет естественного холода;

— создание нового оборудования, использующего природные источники холода (теплообменные аппараты, генераторы льда и др.);

Таблица 1

Градусо-сутки отопительного периода городов России и других северных стран

Страна	Город	ГСОП, при температуре внутреннего воздуха 20 °С, °С·сут/год	Доля населения города в населении страны, %
Россия	Новосибирск	6141	1,09
	Санкт-Петербург	4796	3,60
	Екатеринбург	5980	0,99
	Москва	4515	8,43
Финляндия	Хельсинки	4232	11,29
Исландия	Рейкьявик	4168	35,73
Канада	Оттава	3986	2,58
Норвегия	Осло	3753	12,07
Швеция	Стокгольм	3445	9,17



Рис. 1. Классификация систем холодоснабжения

— изобретение различных способов аккумуляирования естественного холода;

— оптимизация схем и оборудования с целью сокращения энергозатрат, массогабаритных характеристик и повышения надежности работы систем.

Отдельно следует упомянуть разработку систем, совмещающих использование природного холода и низкопотенциального тепла, получаемого при охлаждении тепловыделяющего оборудования для теплоснабжения зданий, и использование природной энергии для получения холода в первую очередь путем создания солнечных сорбционных холодильных установок.

Одним из наиболее распространенных объектов применения природных источников холода являются системы охлаждения центров обработки данных (ЦОД), где находятся существенные избытки явной теплоты. Фрикулинг (использование холодного воздуха окружающей среды) может быть прямым или косвенным в зависимости от способа подачи холодного воздуха в помещение. Прямой фрикулинг — это непосредственная подача воздуха в охлаждаемое помещение, а косвенный предусматривает наличие дополнительного водяного контура, обеспечивающего лучшее качество приточного воздуха, а также требуемую влажность. Отметим, что организация схем с косвенным фрикулингом требует больших затрат, нежели схемы прямого охлаждения. Несмотря на развитие информационных технологий и резкий рост количества ЦОД в России,

основные исследования свободного охлаждения в этой отрасли сделаны за рубежом. Например, в Стокгольме тепло, вырабатываемое оборудованием дата-центров, собирается и перенаправляется в центральную отопительную сеть. Согласно [4] с помощью одного ЦОД мощностью 10 МВт можно обогреть 20 тысяч квартир, а к 2040 г. планируется полностью отказаться от ископаемого топлива.

В работах [5, 6] рассмотрены основные способы организации систем охлаждения центров обработки данных и проанализирована эффективность фрикулинга, в [7, 8] рассчитаны системы термостабилизации ЦОД со свободным охлаждением, а также изучена возможность сброса избытков теплоты в отопительную сеть. Результаты сопоставительных исследований агрегатов с естественным охлаждением (типа FOCS-FC) и без свободного охлаждения (типа FOCS), установленных в городах Швеции и Франции, приведены в [9]. При любом распределении температуры воздуха по времени суток и месяцам агрегаты с естественным охлаждением демонстрировали большую эффективность и обеспечивали экономию энергии 20...40 %, что отражено на рис. 2.

Еще одним распространенным объектом научных исследований являются системы охлаждения, применяемые при транспортировке и хранении пищевых продуктов. В работах российских исследователей особое внимание уделено молочной промышленности, напри-

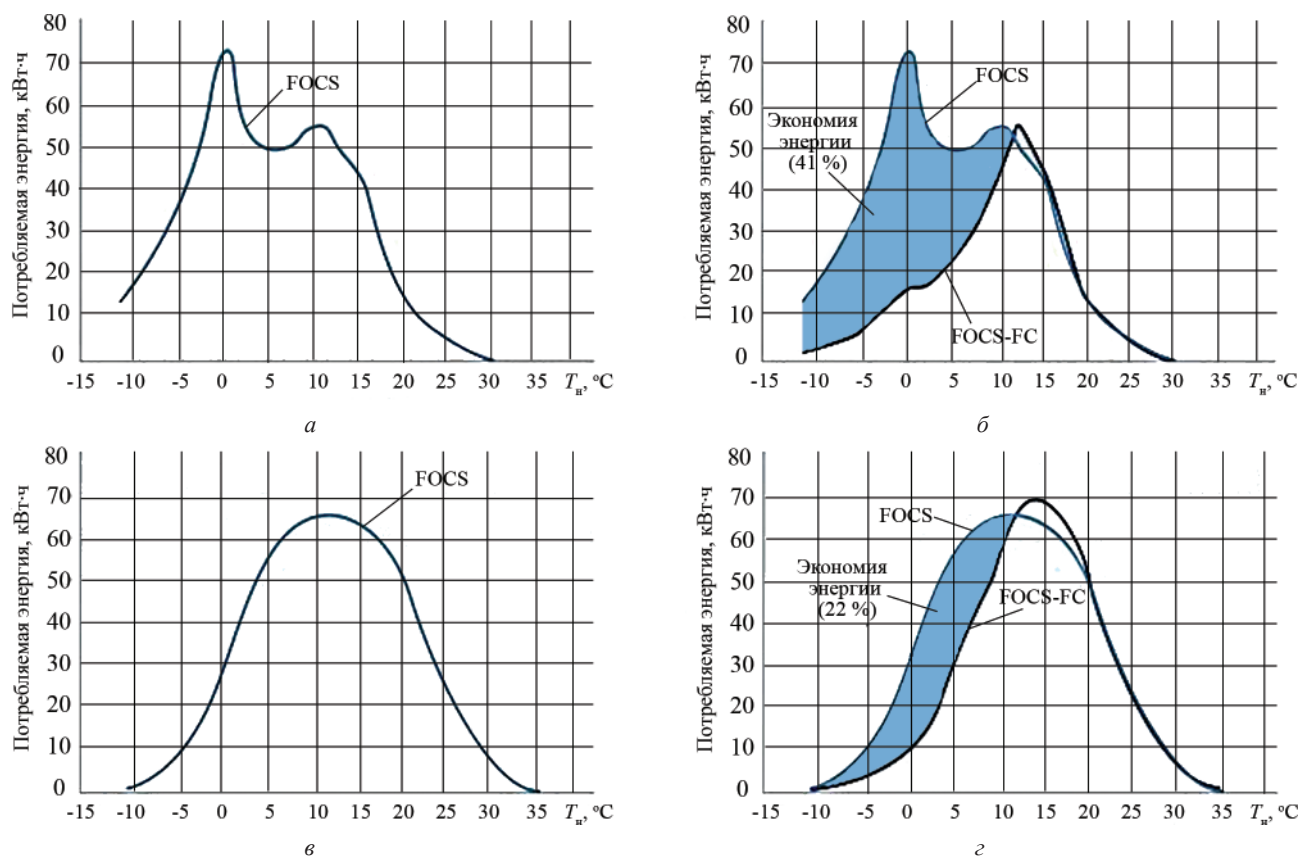


Рис. 2. Графики зависимости потребления энергии агрегатами FOCS и FOCS-FC от температуры наружного воздуха в Швеции (Стокгольм) (а, б) и во Франции (Лион) (в, г) [24]

мер, в [10 — 15] исследованы системы охлаждения молока с использованием естественного холода. В разработанной в [12] системе за счет свободного охлаждения себестоимость молока была снижена на 0,88 руб./кг, годовой экономический эффект составил 349 550 руб./год при массе используемого льда 2751 кг. В патентах [13 — 15] проанализирована техническая реализация охлаждения молока за счет аккумуляции холодного потенциала окружающей среды. Во всех случаях включенные в схемы охлаждения аккумуляторы естественного холода позволили снизить энергопотребление системы в течение года, а в некоторые месяцы полностью отказаться от холодильной машины.

Значительная часть опубликованных работ посвящена системам естественного охлаждения пищевых продуктов (молока, рыбы, мяса). Системы охлаждения при перевозке рыбных продуктов, хранении мяса, а также системы обеспечения качества скоропортящейся продукции в супермаркетах на базе природных источников холода рассмотрены в [16 — 19].

За последние десятилетия произошли существенные продвижения в вопросе аккумуляции холода: разработаны или усовершенствованы водно-солевые баки и контейнеры, гелевые капсулы для пищевых холодильников, силиконовые пакеты, созданы генераторы чешуйчатого или кубикового льда, а также ледяной шуги и гранул путем распыла жидкости [20 — 22].

Наиболее широко используемыми являются аккумуляторы льда или ледяной воды, поскольку лед позволяет запастись существенно больше холода в том же объеме. Модель ледника, позволяющая осуществлять намораживание льда на стенках емкости, описана в [23].

Проведен анализ практического опыта использования систем на базе природных источников холода, которыми являются лед, снег, воды рек, озер и морей, подземные и артезианские воды, а также холод наружного воздуха. Данные о реализованных в различных странах проектах приведены в табл. 2 — 4.

Главное достоинство использования снега или льда заключается в возможности аккумуляции холода и, соответственно, снижения нагрузки с холодопотребляющего оборудования в теплый период года. Однако для крупномасштабных систем охлаждения требуются существенные размеры аккумуляторов (тысячи, а иногда и десятки тысяч кубических метров).

Для объектов, характеризующихся близостью к природному водоему, подобный способ естественного охлаждения наиболее удобен и эффективен, но стоит отметить его отрицательное влияние на экологическое состояние источника, поскольку нагрев воды уменьшает растворимость в ней кислорода и, таким образом, ухудшает условия жизни живых организмов.

Главное достоинство использования холодного наружного воздуха — повсеместная доступность ресурса

Таблица 2

## Современные проекты систем охлаждения с использованием снега и льда

Вид источника	Страна	Реализуемый проект
Снег	Швеция	Система Snowpower для охлаждения больницы Сундсвалль (использует 60 000 м <sup>3</sup> снега) Проект для централизованного охлаждения технического университета Лулео [24]
	Япония	Система охлаждения аэропорта на о. Хоккайдо (собранный снег обеспечивает экономию 30% энергии, затрачиваемой на охлаждение) [25] Снежные хранилища в муниципалитете Акита (общая площадь блока хранения составляет около 33 м <sup>2</sup> ) [26]
	Германия, Норвегия, Россия	Охлаждение складов пищевой продукции, рыбных хранилищ (г. Самара, охлаждение в теплый период года склада с овощами массой 7 т, поддерживаемая температура 1... 2 °С) [27]
Лед	США, Канада, Россия	Использование метода зимнего дальнеструйного дождевания для накопления льда (суточная производительность составляет 1000 т льда на севере Сибири и 500 т в центральных и южных районах Западной Сибири) [28] Ледяные хранилища и склады для хранения пищевых продуктов.

Таблица 3

## Современные проекты систем охлаждения с использованием природных источников холодной воды

Вид источника	Страна	Реализуемый проект
Подземные воды	Новая Зеландия	Охлаждение зданий с помощью геотермальных источников в г. Крайстчерч [29]
	Швеция	Системы охлаждения и подогрева аэропорта Арланда (г. Стокгольм) водой из водоносного пласта (снижают потребление электрической мощности на 4 ГВт и тепловой мощности примерно на 15 ГВт [30])
	США	Использование низкопотенциальных грунтовых вод для систем холодоснабжения гостинично-офисного комплекса в г. Луисвилль штат Кентукки (мощность системы 10 МВт) [31]
Воды рек, озер и морей	Канада	Системы охлаждения зданий г. Торонто водой из озера Онтарио (система мощностью 207 МВт для охлаждения 3 200 000 м <sup>2</sup> помещений)
	США	Охлаждение школ округа Итака Сити водой озера Кайюга в штате Нью-Йорк (мощность системы 51 МВт, цена решения 55...60 млн долларов) Системы охлаждения в природной энергетической лаборатории в штате Гавайи
	Полинезия	Водяное охлаждение океанскими водами спа-центра на о. Бора-Бора путем передачи холодной морской воды через теплообменный аппарат
	Китай	Системы водяного охлаждения отелей и офисных зданий в Гонконге и Шанхае [32].
	Россия	Водяное охлаждение, использующее энергию озер и рек: Байкала, Оби, Енисея, Амура и т. д.
	Швейцария	Системы охлаждения зданий офисного комплекса водами Женевского озера

Таблица 4

## Современные проекты систем охлаждения на базе холодного воздуха окружающей среды

Вид источника	Страна	Реализуемый проект
Ночной холод	США	Система охлаждения в доме Д. Балкомба в Санта-Фе штата Нью-Мексико [33] Система охлаждения ЦОД «Меркурий» компании eVau в г. Финикс штат Аризона (ЦОД площадью 12 600 м <sup>2</sup> и мощностью 4 МВт)
Фрикулинг (использование холодного наружного воздуха)	Россия	Модульная система EcoBreeze производства Schneider Electric компании DataPro в Москве (ЦОД общей установленной мощности 20 МВт использует фрикулинг с адиабатическим увлажнением) Системы охлаждения наружным воздухом для овощехранилищ
	США	Технология естественного охлаждения ЦОД компании Facebook в Прайнвилле и Форест-Сити в штате Северная Каролина (основная система — прямой фрикулинг с несколькими камерами подготовки воздуха) [34]
	Ирландия	Системы охлаждения с фрикулингом для ЦОД компаний Amazon, Microsoft, Google и т. д. в Дублине (ЦОД компании Microsoft имеет площадь 51 000 м <sup>2</sup> и мощность 13 МВт)
	Япония	Системы естественного охлаждения офисных зданий и центров обработки данных компании Sakura Internet в пригороде Ишикари о. Хоккайдо [35]



и удобство непосредственного применения. Отрицательным фактором являются существенные колебания температуры окружающей среды даже в течение короткого промежутка времени.

Несмотря на то, что приведенный в табл. 2 — 4 перечень не является полным, он позволяет оценить примерный порядок суммарной мощности установок, в которых используется естественный холод. Системы с использованием снега и льда обладают мощностью примерно 1 ГВт, системы с использованием холодной воды — около 5 ГВт, системы с использованием холодного воздуха — 100 МВт.

Исходя из анализа мирового опыта, были выделены системы, в которых использование естественного холода получило наибольшее распространение, а именно:

- кондиционирования воздуха аэропортов, больниц и гостинично-офисных комплексов;
- охлаждения пищевой продукции;
- охлаждение оборудования центров обработки данных.

Схема наиболее перспективных отраслей с точки зрения использования природного холода изображена на рис. 3.

Рассмотрим несколько потенциальных направлений применения источников природного холода и дадим оценку их перспективности в условиях России.

### Естественное охлаждение для нефтегазовой промышленности

Нефтегазовая отрасль — одна из ведущих отраслей промышленности Российской Федерации. Процессы

охлаждения занимают здесь важное место, в первую очередь это касается получения сжиженного природного газа (СПГ). Доля использования природного газа в энергобалансе России составляет более 50 % [36]. Согласно [37] к 2020 г. на территории РФ планируется реализовывать 15 млрд м<sup>3</sup> газа в год в качестве моторного топлива, из них 25 % (3,8 млрд м<sup>3</sup>) в форме СПГ. Ожижение природного газа позволяет транспортировать его на специальных морских судах в страны и регионы, где нет возможности получать его по трубопроводам, однако сам процесс очень энергозатратен. На охлаждение и последующее сжижение природного газа уходит до четверти всей энергии, содержащейся в его расчетном объеме.

Полное обеспечение температурного уровня естественными источниками в данной сфере невозможно, поскольку сжижение метана, составляющего основу природного газа, происходит при температуре  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ , однако включение в общую схему ожижения линии естественного охлаждения может частично снять нагрузку с холодильных машин.

Технологическая схема для малотоннажного производства СПГ разработана в [38]. В ней предусмотрено использование предварительного охлаждения с помощью пропановой холодильной машины. Применение холода окружающей среды может привести к снижению нагрузки холодильного цикла путем внедрения линии естественного охлаждения в схему холодильной установки.

Рассчитана экономия энергии от внедрения в схему предварительного естественного охлаждения в

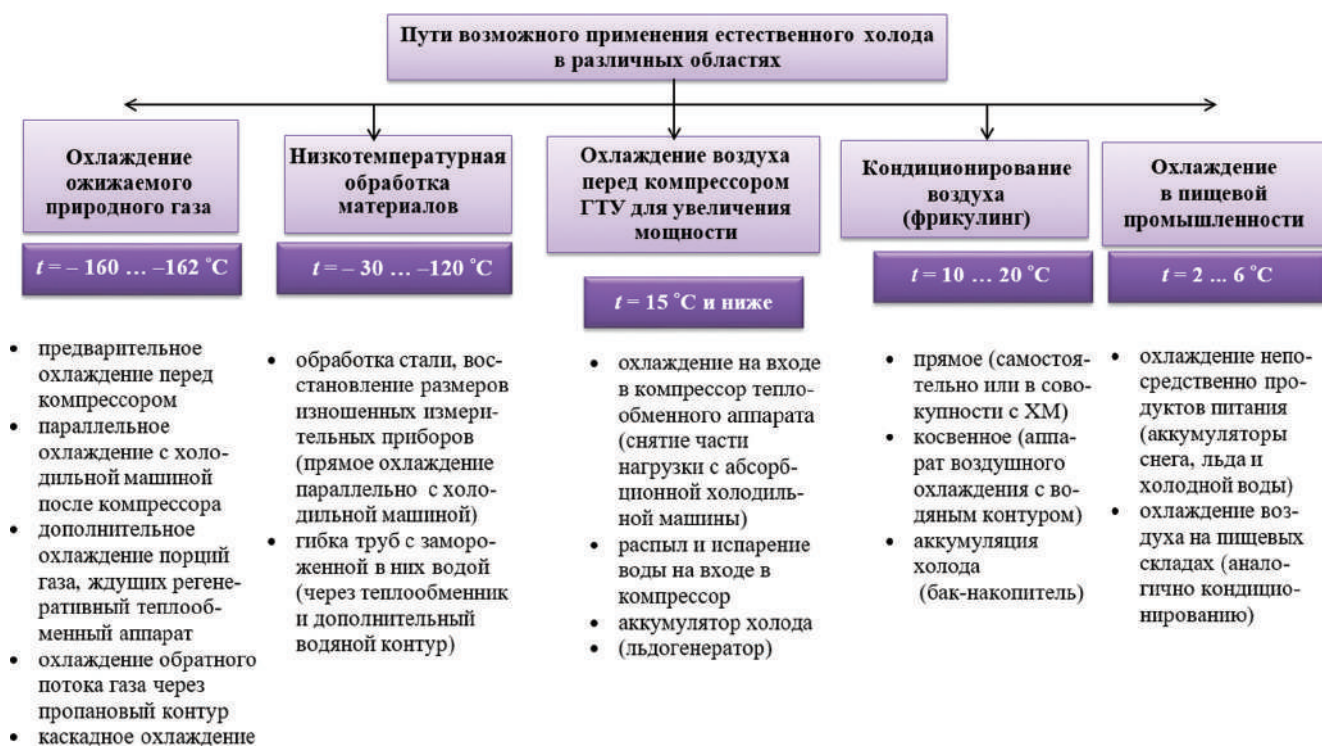


Рис. 3. Области возможного применения холода окружающей среды

климатических условиях г. Салехарда на примере малотоннажной установки ожижения природного газа производительностью  $G = 2$  т/ч или  $0,556$  кг/с газа. Температура природного газа на выходе из скважины после фильтрации составляла  $30$  °С. Теплоемкость природного газа принималась равной удельной теплоемкости метана  $c_p = 2,165$  кДж/кг. Пройдя компрессор, поток газа охлаждался обратным потоком до температуры примерно  $200$  К. Проведено сравнение энергопотребления в схеме при охлаждении газа холодильным контуром и потенциалом наружного воздуха.

Для самого холодного месяца в Салехарде ( $t_{\text{про}}^{\text{январь}} = -25,3$  °С) предварительное охлаждение наружным воздухом позволяет получить экономию порядка  $100$  тыс. руб./мес. при текущем значении тарифа на электроэнергию в регионе. Экономия энергии весьма мала по сравнению с теми затратами, которых потребует установка дополнительных коммуникаций теплообменных аппаратов, а также систем автоматики. Это объясняется слишком глубоким требуемым охлаждением ( $-160$  °С), а также уже используемым в таких схемах эффективным решением — охлаждением прямого потока газа обратным потоком несконденсировавшегося газа.

### Естественное охлаждение в энергетике

Охлаждение в этой отрасли используется, в первую очередь, для отвода теплоты от компрессоров газотурбинных установок и конденсаторов паровых турбин. В работе [39] проанализирована возможность увеличения выработки электроэнергии на теплоэлектроцентрали за счет использования утилизируемого снега, собираемого с улиц города, для охлаждения оборотной воды и достижения более низкой температуры конденсации пара.

Для повышения КПД и выходной мощности газотурбинных установок широко используется охлаждение воздуха перед его подачей в компрессор. Снижение температуры подаваемого в турбину воздуха с  $40$  до  $15$  °С предотвращает снижение мощности ГТУ на

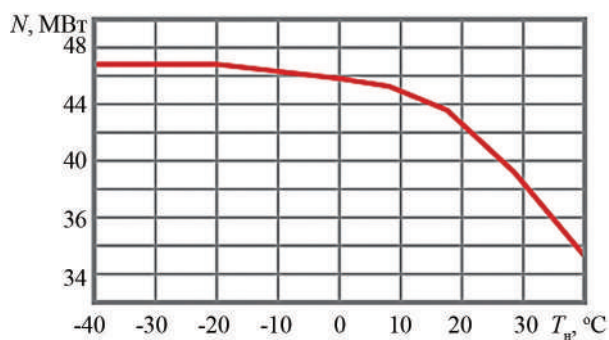
$30$  %. При температуре входного воздуха  $5...15$  °С наблюдаются максимумы выходной мощности и КПД установки [40]. Вид зависимости мощности газотурбинного энергетического аппарата ГТЭ-16 от температуры наружного воздуха и схема газотурбинной установки (ГТУ) с предварительным охлаждением воздуха представлены на рис. 4.

Наиболее распространенный способ снижения температуры воздуха на входе в компрессор ГТУ — использование холодильных машин абсорбционного типа (АБХМ) в качестве источников дешевой или сбросной теплоты. Вместо использования АБХМ для охлаждения воздуха перед ГТУ возможно внедрение естественного охлаждения.

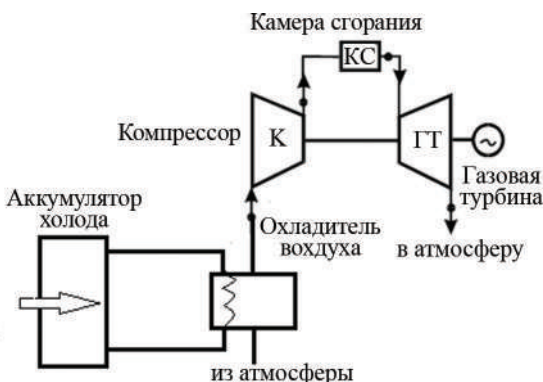
Большое число отечественных и зарубежных работ посвящено исследованию зависимости мощности и КПД газотурбинной установки от температуры наружного воздуха. В работах [41, 42] проведена оптимизация параметров воздуха на входе в компрессор установки для разных климатических условий. В публикации [43] установлено, что для ГТУ GT-85-2-Н в климатических условиях Ирака один процент впрыскиваемой воды в тракт проточной части увеличивает выходную мощность на  $5,2$  %, при этом КПД установки возрастает на  $12$  %, а в [44] исследована возможность охлаждения входного воздуха с помощью аккумулятора льда объемом  $4300$  м<sup>3</sup>.

Эффективность применения работы АБХМ и испарительного охлаждения на входе в компрессор энергетических установок сравнивались в [45 — 48]. Работа газотурбинной электростанции в г. Бангкоке проанализирована в [48] и найдена возможность увеличения ее мощности на  $11$  % за счет охлаждения воздуха потоком холодной воды.

Рассмотрен энергосберегающий эффект от охлаждения воздуха на входе в компрессор газотурбинной энергетической установки ГТЭ-16 с использованием аккумулятора льда в климатических условиях г. Ханты-Мансийска. Принципиальная схема установки аналогична изображенной на рис. 4, б. На основе клима-



а



б

Рис. 4. Зависимость мощности ГТЭ-16 от температуры наружного воздуха (а) и принципиальная схема ГТУ простого цикла с предварительным охлаждением воздуха (б)

тической характеристики ГТЭ (рис. 4, а), ее мощности (16 мВт) и данных о температурах наружного воздуха в различные месяцы года нетрудно оценить стоимость дополнительно вырабатываемой энергии при полной загрузке установки. Для аккумулятора льда объемом 4300 м<sup>3</sup> количество запасенного холода складывается из холода, высвобождаемого при плавлении льда и нагреве ледяной воды. Запасенный холод используется для охлаждения воздуха до +15 °С. С учетом величины тарифа в регионе, равного 2,45 руб/кВт·ч, экономия составит 3 260 000 руб.

Таким образом, запасая лед зимой и используя его холод для охлаждения воздуха летом, можно получить существенную экономию. Однако это возможно только в регионах с холодной зимой, а объемы аккумулируемого льда могут иметь очень большие размеры. Для принятия решения о целесообразности применения естественного холода в этом случае необходимы детальные технико-экономические расчеты.

### Естественное охлаждение для систем кондиционирования воздуха и охлаждения дата-центров

За последние пятнадцать лет информационные и компьютерные технологии шагнули далеко вперед, что привело к быстрому росту количества используемого серверного оборудования. По данным [49] на конец 2013 г. российский рынок коммерческих ЦОД насчитывал более 170 центров обработки данных, а в 2014 г. он вырос еще на 30 %. Ожидается, что к 2018 г. количество установленных стоек в центрах обработки данных увеличится до 48,3 тыс.

На примере ЦОД мощностью 200 кВт, рассчитанного на сорок телекоммуникационных стоек и расположенного в климатических условиях г. Москвы, была исследована эффективность внедрения свободного охлаждения в систему термостабилизации. Схема охлаждения серверного помещения показана на рис. 5.

Воздух с улицы в теплый период года поступает в холодильную машину, где охлаждается перед подачей в телекоммуникационные стойки. В переходный период

он направляется непосредственно в телекоммуникационные стойки по линии фрикулинга с дополнительным охлаждением в холодильной машине или без него. При низких температурах наружного воздуха его требуется подогревать, поскольку температура подаваемого холодного воздуха в стойки не должна опускаться ниже 14 °С по технологическим требованиям [50]. Для этого в схеме предусмотрен электроподогреватель, кроме того подогрев воздуха в зимний период года можно осуществлять, если холодильная машина будет работать в режиме теплового насоса. В схеме предусмотрена рециркуляция вытяжного воздуха. Были рассчитаны два режима работы: работа парокомпрессионной холодильной машины и комбинированный режим работы линий фрикулинга, рециркуляции и холодильной машины. Энергопотребление системы в обоих режимах отражено на рис. 6.

Наибольшую эффективность система охлаждения имеет в режиме совместной работы рециркуляции и фрикулинга в холодный и переходный периоды года. Так, для г. Москвы стоимость сэкономленной электроэнергии равна 7,8 млн руб., что составляет более 90 % от энергозатрат в режиме традиционного охлаждения.

### Естественное охлаждение в молочной промышленности

В настоящее время российская пищевая промышленность объединяет в себе 25 тыс. предприятий, а ее доля в объеме российского производства более 10 %. Анализ литературы показал, что наибольший интерес в пищевой промышленности для России представляют схемы охлаждения молока.

На примере молочного комбината, перерабатывающего до 1170 т/сут. молока и расположенного в г. Москве была исследована система охлаждения молока после его пастеризации. Охлаждение должно обеспечить снижение температуры молока с 80 °С после пастеризации до 2...6 °С. Для комбината предложена комбинированная схема охлаждения с совместной работой холодильной машины и вентиляторной градир-

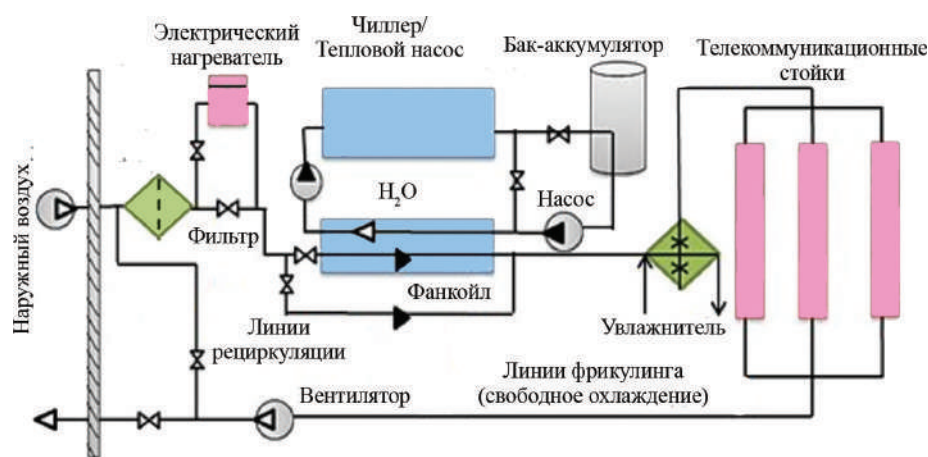


Рис. 5. Схема охлаждения с линией фрикулинга и частичной рециркуляцией отводимого воздуха



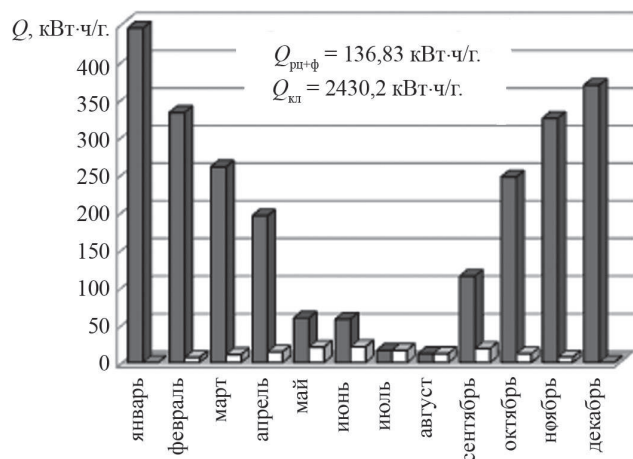


Рис. 6. Изменение расхода электроэнергии для охлаждения или нагрева воздуха, подаваемого в телекоммуникационную стойку, для Москвы в течение 2014 г:

■ — традиционное охлаждение; □ — с рециркуляцией и естественным охлаждением

ни. Кроме того, в схеме предусмотрены бак-накопитель холодной воды, аппарат воздушного охлаждения (АВО), а также контур свободного охлаждения конденсатора холодильной машины. Принципиальная схема системы охлаждения изображена на рис. 7.

Энергопотребление системы в различные месяцы года рассчитано на основе уравнений теплового баланса и теплопередачи, записанных для элементов системы. Имитационная модель указанной схемы составлена в программной среде Matlab Simulink. Задавая объемы молочной цистерны и бака-накопителя воды равными 50 и 75 т соответственно, площади теплообменных поверхностей, коэффициенты теплопередачи и расходы теплоносителей, а также зная среднемесячные температуры воздуха в рассматриваемом регионе, можно оценить энергозатраты в двух режимах работы: работы холодильной машины и комбинированной работы градирни (АВО) и холодильной машины. Энергопотребление системы в обоих режимах по месяцам года показано на рис. 8. Отметим, что для исследования была выбрана наиболее простая схема.

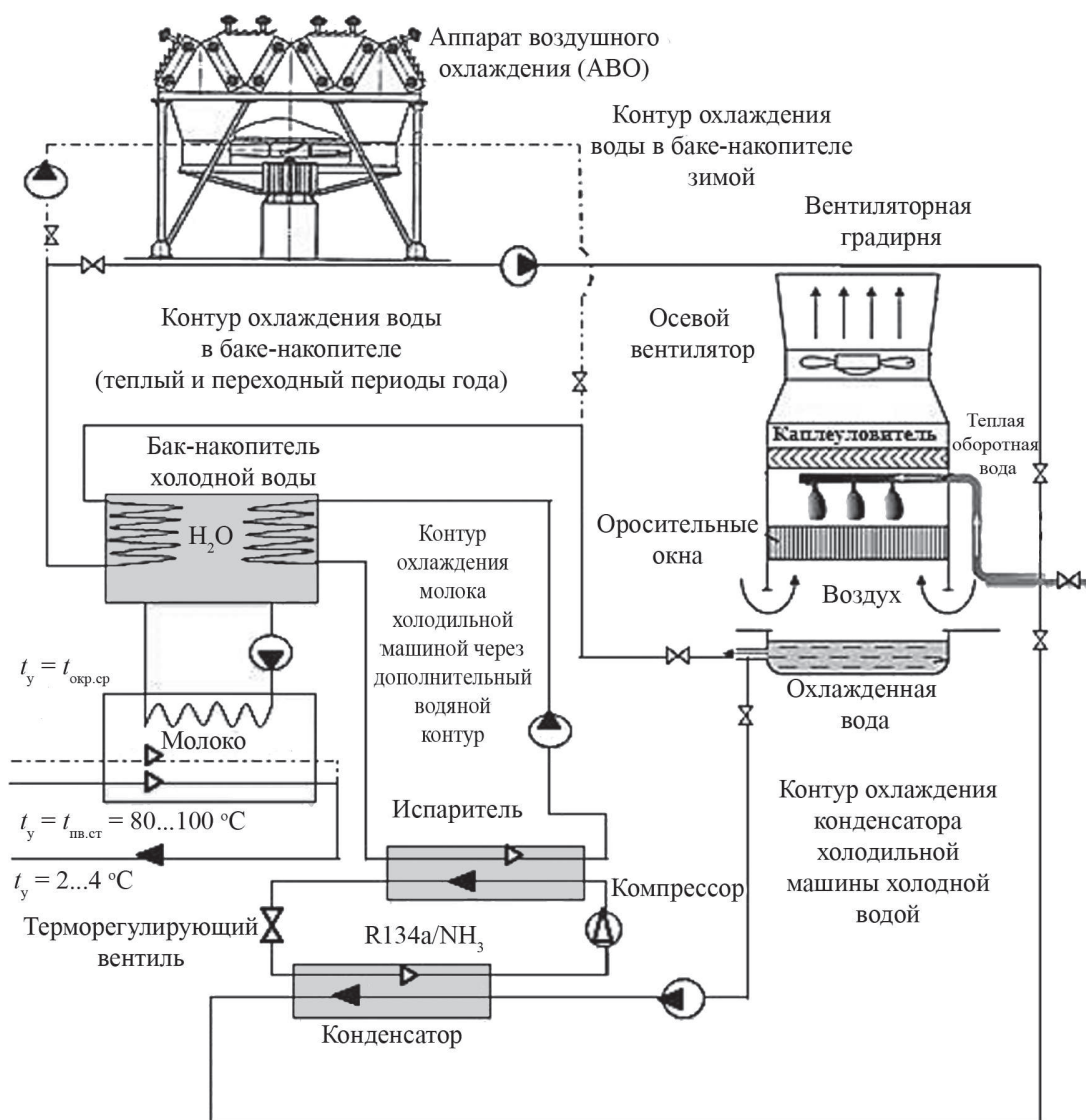


Рис. 7. Принципиальная схема системы охлаждения молочного комбината

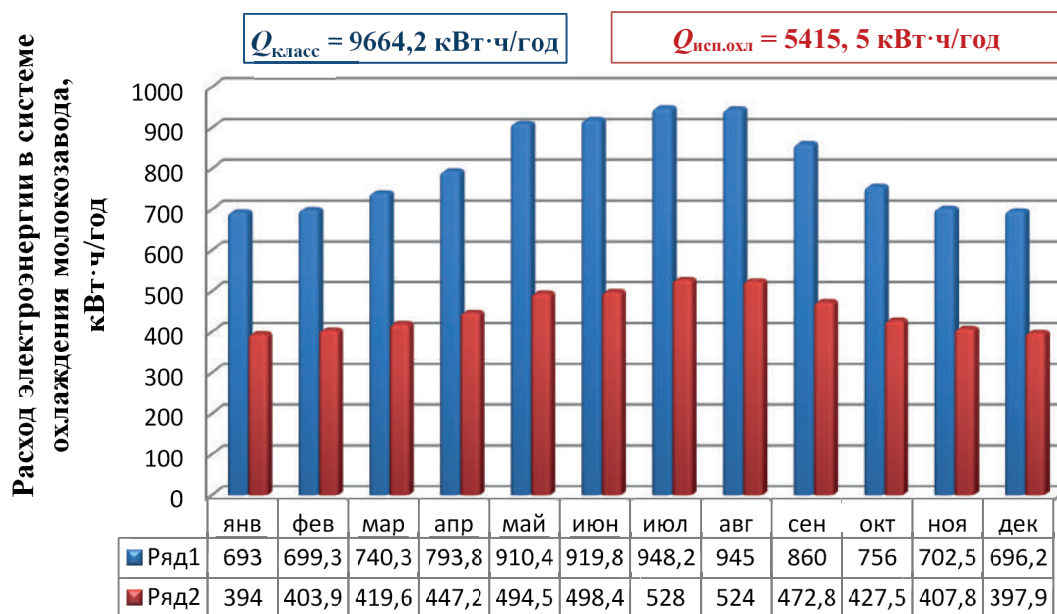


Рис. 8. Изменение расхода электроэнергии для системы охлаждения молочного завода в Москве в течение года:

■ — традиционное охлаждение; ■ — естественное охлаждение

Экономия электроэнергии составила 44 % от энергопотребления в традиционном режиме охлаждения, а ее стоимость при текущем значении тарифа составила для г. Москвы 15,1 млн руб. Расчет схемы проведен для одноставочного тарифа, в то время как возможна работа установки в ночное время суток при сниженном тарифе на электроэнергию.

## Заключение

Анализ данных о практическом использовании естественного охлаждения показал, что оно крайне незначительно по сравнению с масштабами использования искусственного холода. Мощность установок, работающих с естественным холодом, в мире имеет порядок 10 ГВт и постоянно растет. Россия существенно отстает в этой области от западных стран, несмотря на большие возможности, особенно в регионах с континентальным климатом.

Наряду с традиционными направлениями быстро развивается применение естественного холода в системах кондиционирования воздуха и, особенно, для охлаждения серверного оборудования ЦОД (прямой и косвенный фрикулинг).

Использование естественного холода для охлаждения серверного оборудования ЦОД и охлаждения молока позволяет в более чем в два раза (в зависимости от климатической зоны и выбранной схемы охлаждения) сократить потребление электроэнергии. Применение естественного охлаждения для таких целей, как ожижение природного газа перед его сжижением и охлаждения воздуха, направляемого в компрессор ГТУ, менее эффективно и требует серьезных технико-экономических оценок.

Разработка и оптимизация энергосберегающих схем и нового оборудования, использующего природные источники холода, имеет большое значение, поскольку позволяет существенно сократить потребление электроэнергии путем снятия нагрузки с холодильных машин.

## Литература

1. Бараненко А.В., Таганцев О.М. Состояние и перспективы развития холодильной отрасли России: ХолодЭкспо — Россия: Материалы конф. М., 2009.
2. Global Energy Statistical Yearbook [Электрон. ресурс] <https://yearbook.enerdata.ru> (дата обращения 30.04.2017).
3. Гашо Е.Г., Пузаков В.С. Схемы теплоснабжения: что дальше? // ЭСКО. Города и здания. 2014. № 11, 12 [Электрон. ресурс] [http://journal.esco.co.ua/cities/2014\\_11\\_12/art200.html](http://journal.esco.co.ua/cities/2014_11_12/art200.html) (дата обращения 15.04.2017).
4. Альтернативная энергия в Японии [Электрон. ресурс] <http://info-japan.ru> (дата обращения 29.04.2017).
5. Теплоснабжение домов теплом от дата-центров [Электрон. ресурс] <https://rb.ru/story/data-centers-and-heating> (дата обращения 20.03.2017).
6. Барсков А. Охлаждение ЦОД: от PUE к WUE // Журнал сетевых решений LAN. 2014. № 1. С. 31—37.
7. Mackay K. Energy Efficient Cooling Solutions for Data Centers. PhD dissertation. Stockholm: Strathclyde University, 2012.
8. Posladek G. An Investigation into Using Free Cooling and Community Heating to Reduce Data Center Energy Consumption. Stockholm: Strathclyde University, 2010.

9. **Pervila M.** Data Center Energy Retrofits. Helsinki: University of Helsinki, 2013.
10. **Чиллеры** с естественным охлаждением [Электрон. ресурс] <http://www.climaveneta.com>. (дата обращения 16.11.2016).
11. **Мальнев В.П.** Электрифицированная система охлаждения молока с использованием естественного холода для хозяйств Центральной зоны России: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: Россельхозакадемия, 2004.
12. **Мусин А.М.** Использование естественного холода в автоматизированных системах охлаждения молока // Холодильная техника. 1989. № 1.
13. **Коровин Г.С.** Разработка и обоснование водоборотного ледяного аккумулятора для молочно-товарных ферм: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Оренбург: Оренбургский гос. аграрный ун-т, 2015.
14. **Пат. № 2185578 РФ.** Устройство для охлаждения сельскохозяйственной продукции естественным холодом грунта / Ф.Г. Марьяхин и др. // Бюлл. изобрет. 2002. № 20.
15. **Мульган А.А.** Энергосберегающая комбинированная система охлаждения молока с использованием природного холода и водолеяного аккумулятора // Ползуновский вестник. 2011. № 2/1. С. 204—208.
16. **Пат. № 120846 РФ.** Устройство для охлаждения молока с аккумулятором холода / А.С. Мокшанов, А.Н. Балалаев // Бюлл. изобрет. 2012. № 28.
17. **Margeirsson B.** Modelling of Temperature Changes During Transport of Fresh Fish Products. Reykjavik: University of Iceland, 2012.
18. **Jihan F.J.** Modeling Heat Transfer During Cooling of Ready-to-eat Meat and Poultry Products Using Three-dimensional Finite Element Analysis and Webbased Simulation. Lincoln: University of Nebraska-Lincoln, 2010.
19. **Filipsson P.** Competitiveness of District Cooling in Energy Efficient Supermarkets. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2011.
20. **Grozdek M.** Load Shifting and Storage of Cooling Energy through Ice Bank or Ice Slurry Systems — modelling and experimental investigation. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2009.
21. **Зейгарник Ю.А. и др.** Сезонное аккумулярование природного холода // Ползуновский вестник. 2012. № 4. С. 190—195.
22. **Тарасова Е.В.** Системы кондиционирования воздуха с сезонными аккумуляторами естественного холода: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Тюмень: Дальневосточный федеральный ун-т, 2013.
23. **Серенов И.И.** Моделирование процесса замораживания при создании различных форм хладостойкой массы водного льда с использованием низкотемпературного потенциала окружающей среды: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
24. **Зверев С.С.** Холодильник-аккумулятор естественного холода в условиях Якутии // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2008. № 10. С. 103—108.
25. **Снег** для летнего охлаждения [Электрон. ресурс] <http://advantage-environment.com> (дата обращения 01.11.2016).
26. **Снег** для охлаждения японского аэропорта [Электрон. ресурс] <http://www.treehugger.com> (дата обращения 01.11.2016).
27. **Снежные** хранилища [Электрон. ресурс] [http://web-japan.org/trends/11\\_tech-life/tec140414.html](http://web-japan.org/trends/11_tech-life/tec140414.html) (дата обращения 01.11.2016).
28. **Система** охлаждения с использованием естественного холода [Электрон. ресурс] <http://www.thermonews.ru> (дата обращения 01.11.2016).
29. **Искусственный** фирн и системы кондиционирования [Электрон. ресурс] <http://www.c-o-k.ru> (дата обращения 01.11.2016).
30. **Геотермальные** источники [Электрон. ресурс] <http://www.nzgeothermal.org> (дата обращения 01.11.2016).
31. **Система** охлаждения аэропорта Арланда [Электрон. ресурс] <http://www.swedavia.com/arlanda> (дата обращения 01.11.2016).
32. **Низкопотенциальные** грунтовые воды [Электрон. ресурс] <http://www.dslib.net> (дата обращения 01.11.2016).
33. **Пархомчук В.В., Скринский А.Н.** Электронное охлаждение — 35 лет развития // УФН. 2000. Т. 170. № 5. С. 473—493.
34. **Пассивное** охлаждение ночным воздухом [Электрон. ресурс] <http://solarhouses.ru> (дата обращения 01.11.2016).
35. **Охлаждение ЦОД** [Электрон. ресурс] <http://tecomblogger.ru> (дата обращения 01.11.2016).
36. **Фрикулинг** для охлаждения облачных ЦОД в Дублине [Электрон. ресурс] <http://www.aboutdc.ru> (дата обращения 01.11.2016).
37. **Данилов О.Л. и др.** Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М.: Издат. дом МЭИ, 2010.
38. **Поручение** Президента Российской Федерации № Пр-1294 от 11 июня 2013 г. «Об обеспечении достижения целевых показателей социально-экономического развития Российской Федерации» // Перечень поручений. 2013.
39. **Медведков И.С.** Низкотемпературные процессы очистки при малотоннажном производстве сжиженного природного газа повышенного качества: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2013.
40. **Очков В.Ф.** Сохранение и развитие тепловых электростанций или *n*-генерация // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 1. С. 50—61.
41. **Клименко В.В. и др.** Эффективность работ газотурбинных установок в России в меняющихся климатических условиях // Теплоэнергетика. 2016. № 10. С. 14—23.

42. **Альрави А.И.** Оптимизация параметров ПГУ и систем охлаждения наружного воздуха ПГУ и ГТУ для территорий с жарким климатом: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, 2012.

43. **Рабенко В.С., Будаков И.В.** Об особенностях эксплуатации энергоблоков ПГУ в климатических условиях России // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 6. С. 1—5.

44. **Хамза Н.Х.** Оптимизация впрыска воды в тракт проточной части ГТУ, работающей в условиях Ирака: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: Новочеркасский политехн. институт им. М.И. Платова, 2015.

45. **Zurigat Y., Dawoud B., Bortmany J.** On the Technical Feasibility of Gas Turbine Inlet Air Cooling Utilizing Thermal Energy Storage // Intern. J. Energy Research. 2006. V. 30. Pp. 291—305.

46. **Ondryas I. e. a.** Options in Gas Turbine Power Augmentation Using Inlet Air Chilling // Trans ASME of Eng. for Gas Turbines and Power. 1991. V. 113. Pp. 203—211.

47. **Ameri M., Nabati H., Keshtgar A.** Gas Turbine Power Augmentation Using Fog Inlet Cooling System // Proc. ESDA04 7<sup>th</sup> Biennial Conf., 2004.

48. **Mohanty B., Poloso G.** Enhancing Gas Turbine Performance by Intake Air Cooling Using an Absorption Chiller // Heat Recovery Syst. 1995. V. 15. Pp. 41—50.

49. **Российский рынок коммерческих дата-центров 2013—2017** [Электрон. ресурс] <http://www.iksconsulting.ru> (дата обращения 05.11.2016).

50. **СН 512—78.** Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин.

## References

1. **Baranenko A.V., Tagantsev O.M.** Sostoyanie i Perspektivy Razvitiya Holodil'noy Otrastli Rossii: HolodEkspo — Rossiya: Materialy Konf. M., 2009. (in Russian).

2. **Global Energy Statistical Yearbook** [Elektron. Resurs] <https://yearbook.enerdata.ru> (Data Obrashcheniya 30.04.2017).

3. **Gasho E.G., Puzakov V.S.** Skhemy Teplosnabzheniya: Chto Dal'she? ESKO. Goroda i zdaniya. 2014;11, 12 [Elektron. Resurs] [http://journal.esco.co.ua/cities/2014\\_11\\_12/art200.html](http://journal.esco.co.ua/cities/2014_11_12/art200.html) (Data Obrashcheniya 15.04.2017). (in Russian).

4. **Al'ternativnaya Energiya v Yaponii** [Elektron. Resurs] <http://info-japan.ru> (Data Obrashcheniya 29.04.2017). (in Russian).

5. **Teplosnabzhenie Domov Teplom ot Data-tsentrov** [Elektron. Resurs] <https://rb.ru/story/data-centers-and-heating> (Data Obrashcheniya 20.03.2017). (in Russian).

6. **Barskov A.** Ohlazhdenie TSOD: ot PUE k WUE. Zhurnal Setevykh Resheniy LAN. 2014;1:31—37. (in Russian).

7. **Mackay K.** Energy Efficient Cooling Solutions for Data Centers. PhD dissertation. Stockholm: Strathclyde University, 2012.

8. **Posladek G.** An Investigation into Using Free Cooling and Community Heating to Reduce Data Center Energy Consumption. Stockholm: Strathclyde University, 2010.

9. **Pervila M.** Data Center Energy Retrofits. Helsinki: University of Helsinki, 2013.

10. **Chillery s Estestvennym Ohlazhdeniem** [Elektron. Resurs] <http://www.climaveneta.com>. (Data Obrashcheniya 16.11.2016). (in Russian).

11. **Mal'nev V.P.** Elektrifitsirovannaya Sistema Ohlazhdeniya Moloka s Ispol'zovaniem Estestvennogo Holoda dlya Hozyaystv Tsentral'noy Zony Rossii: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: Rossel'hozakademiya, 2004. (in Russian).

12. **Musin A.M.** Ispol'zovanie Estestvennogo Holoda v Avtomatizirovannykh Sistemah Ohlazhdeniya Moloka. Holodil'naya Tekhnika. 1989;1. (in Russian).

13. **Korovin G.S.** Razrabotka i Obosnovanie Vodooborotnogo Ledianogo Akkumulyatora dlya Moloch-no-tovarnykh Ferm: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. Orenburg: Orenburgskiy Gos. Agrarnyy Un-t, 2015. (in Russian).

14. **Pat. № 2185578 RF.** Ustroystvo dlya Ohlazhdeniya Sel'skohozyaystvennoy Produktzii Estestvennym Holodom Grunta. F.G. Mar'yahin i dr. Byull. Izobret. 2002;20. (in Russian).

15. **Mul'tan A.A.** Energoberegayushchaya Kombinirovannaya Sistema Ohlazhdeniya Moloka s Ispol'zovaniem Prirodnogo Holoda i Vodoledyanogo Akkumulyatora. Polzunovskiy Vestnik. 2011;2/1:204—208. (in Russian).

16. **Pat. № 120846 RF.** Ustroystvo dlya Ohlazhdeniya Moloka s Akkumulyatorom Holoda. A.S. Mokshanov, A.N. Balalaev. Byull. Izobret. 2012;28. (in Russian).

17. **Margeirsson B.** Modelling of Temperature Changes During Transport of Fresh Fish Products. Reykjavík: University of Iceland, 2012.

18. **Jihan F.J.** Modeling Heat Transfer During Cooling of Ready-to-eat Meat and Poultry Products Using Three-dimensional Finite Element Analysis and Webbased Simulation. Lincoln: University of Nebraska-Lincoln, 2010.

19. **Filipsson P.** Competitiveness of District Cooling in Energy Efficient Supermarkets. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2011.

20. **Grozddek M.** Load Shifting and Storage of Cooling Energy through Ice Bank or Ice Slurry Systems — modelling and experimental investigation. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2009.

21. **Zeygarnik Yu.A. i dr.** Sezonnoe Akkumulirovanie Prirodnogo Holoda. Polzunovskiy Vestnik. 2012;4:190—195. (in Russian).

22. **Tarasova E.V.** Sistemy Konditsionirovaniya Vozduha s Sezonnyimi Akkumulyatorami Estestvennogo



Holoda: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. Tyumen': Dal'nevostochnyy Federal'nyy Un-t, 2013. (in Russian).

23. **Serenov I.I.** Modelirovanie Protsessa Zamorazhivaniya pri Sozdanii Razlichnyh Form Hladoemkoy Massy Vodnogo L'da s Ispol'zovaniem Nizkotemperaturnogo Potentsiala Okruzhayushchey Sredy: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: MGTU im. N.E. Baumana, 2016. (in Russian).

24. **Zverev S.S.** Holodil'nik-akkumulyator Estestvennogo Holoda v Usloviyah Yakutii. Sibirskiy Vestnik Sel'skohozyaystvennoy Nauki. 2008;10:103—108. (in Russian).

25. **Sneg dlya Letnego Ohlazhdeniya** [Elektron. Resurs] <http://advantage-environment.com> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

26. **Sneg dlya Ohlazhdeniya Yaponskogo Aeroporta** [Elektron. Resurs] <http://www.treehugger.com> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

27. **Snezhnye Hranilishcha** [Elektron. Resurs] [http://web-japan.org/trends/11\\_tech-life/tec140414.html](http://web-japan.org/trends/11_tech-life/tec140414.html) (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

28. **Sistema Ohlazhdeniya s Ispol'zovaniem Estestvennogo Holoda** [Elektron. Resurs] <http://www.thermonews.ru> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

29. **Iskusstvennyy Firn i Sistemy Konditsionirovaniya** [Elektron. Resurs] <http://www.c-o-k.ru> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

30. **Geotermal'nye Istochniki** [Elektron. Resurs] <http://www.nzgeothermal.org> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

31. **Sistema Ohlazhdeniya Aeroporta Arlanda** [Elektron. Resurs] <http://www.swedavia.com/arlanda> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

32. **Nizkopotentsial'nye Gruntovye Vody** [Elektron. Resurs] <http://www.dslib.net> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

33. **Parhomchuk V.V., Skrin'skiy A.N.** Elektronnoe Ohlazhdenie — 35 Let Razvitiya. UFN. 2000;170;5:473—493. (in Russian).

34. **Passivnoe Ohlazhdenie Nochnym Vozduhom** [Elektron. Resurs] <http://solarhouses.ru> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

35. **Ohlazhdenie TSOD** [Elektron. Resurs] <http://telecblogger.ru> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

36. **Frikuling dlya Ohlazhdeniya Oblachnyh TSOD v Dubline** [Elektron. Resurs] <http://www.aboutdc.ru> (Data Obrashcheniya 01.11.2016). (in Russian).

37. **Danilov O.L. i dr.** Energoberezhenie v Teploenergetike i Teplotekhnologiyah. M.: Izdat. dom MPEI, 2010. (in Russian).

38. **Poruchenie Prezidenta Rossiyskoy Federatsii № Pr-1294 ot 11 iyunya 2013 g. «Ob obespechenii dostizheniya tselevykh pokazateley sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii».** Perechen' porucheniy. 2013. (in Russian).

39. **Medvedkov I.S.** Nizkotemperaturnye Protsessy Ochistki pri Malotonnazhnom Proizvodstve Szhizhennogo Prirodnogo Gaza Povyshennogo Kachestva: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: NIU «MPEI», 2013. (in Russian).

40. **Ochkov V.F.** Sohranenie i Razvitie Teplovyh Elektrostantsiy ili *n*-generatsiya. Energoberezhenie i Vodopodgotovka. 2017;1:50—61. (in Russian).

41. **Klimenko V.V. i dr.** Effektivnost' Rabot Gazoturbinnyyh Ustanovok v Rossii v Menyayushchihsya Klimaticheskikh Usloviyah. Teploenergetika. 2016;10:14—23. (in Russian).

42. **Al'ravi A.I.** Optimizatsiya Parametrov PGU i Sistem Ohlazhdeniya Naruzhnogo Vozduha PGU i GTU dlya Territoriy s Zharkim Klimatom: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. Irkutsk: Institut Sistem Energetiki im. L.A. Melent'eva, 2012. (in Russian).

43. **Rabenko V.S., Budakov I.V.** Ob Osobennostyah Eksploatatsii Energoblokov PGU v Klimaticheskikh Usloviyah Rossii. Energoberezhenie i vodopodgotovka. 2010;6:1—5. (in Russian).

44. **Hamza N.H.** Optimizatsiya Vpryska Vody v Trakt Protochnoy Chasti GTU, Rabotayushchey v Usloviyah Iraka: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. Novochoerkassk: Novochoerkasskiy Politekhn. Institut im. M.I. Platova, 2015. (in Russian).

45. **Zurigat Y., Dawoud B., Bortmany J.** On the Technical Feasibility of Gas Turbine Inlet Air Cooling Utilizing Thermal Energy Storage. Intern. J. Energy Research. 2006;30:291—305.

46. **Ondryas I. e. a.** Options in Gas Turbine Power Augmentation Using Inlet Air Chilling. Trans ASME of Eng. for Gas Turbines and Power. 1991;113:203—211.

47. **Ameri M., Nabati H., Keshtgar A.** Gas Turbine Power Augmentation Using Fog Inlet Cooling System. Proc. ESDA04 7<sup>th</sup> Biennial Conf., 2004.

48. **Mohanty V., Poloso G.** Enhancing Gas Turbine Performance by Intake Air Cooling Using an Absorption Chiller. Heat Recovery Syst. 1995;15:41—50.

49. **Rossiyskiy Rynok Kommercheskikh Data-tsentrov 2013—2017** [Elektron. Resurs] <http://www.iks-consulting.ru> (Data Obrashcheniya 05.11.2016). (in Russian).

50. **SN 512—78.** Instruksiya po Proektirovaniyu Zdanij i Pomeshcheniy dlya Elektronno-vychislitel'nyh Mashin. (in Russian).

---

#### Сведения об авторах

**Гаряев Андрей Борисович** — доктор технических наук, заведующий кафедрой теплообменных процессов и установок НИУ «МЭИ», e-mail: gab874@yandex.ru

**Коротке Юлия Владимировна** — аспирант кафедры теплообменных процессов и установок НИУ «МЭИ», e-mail: stylishflame@mail.ru

---

#### Information about authors

**Garyaev Andrey B.** — Dr.Sci. (Techn.), Head of Heat-and-Mass Exchange Processes and Installations Dept., NRU MPEI, e-mail: gab874@yandex.ru

**Korotke Yulia V.** — Ph.D.-student of Heat-and-Mass Exchange Processes and Installations Dept., NRU MPEI, e-mail: stylishflame@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 01.08.2017*