Прикладные проблемы

УДК 551.322: 620.91

doi:10.15356/2076-6734-2017-2-253-260

Ледовая энергетика: перспективы использования искусственных фирново-ледяных массивов для выработки электроэнергии

© 2017 г. А.В. Сосновский

Институт географии РАН, Москва, Россия
alexandr_sosnovskiy@mail.ru

Ice energy: prospects for the use of artificial firn-ice masses to generate electricity

A.V. Sosnovsky

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
alexandr_sosnovskiy@mail.ru

Received September 18, 2016 *Accepted February 2, 2017*

Keywords: ***artificial firn-ice massifs, ice power plant, ocean thermal energy conversion, thermal gradient, winter irrigation.***

Summary

The problem of the fossil fuel depletion can be solved by means of searching, developing and using of alternative energy sources. One of them is the use of thermogradient power plants, which are operating by the temperature difference of the ocean water near the surface and at great depths. But using of these plants is usually limited by technical issues, and energy expenditures on the rise a large volume of water from the ocean depths. These problems can be solved using the natural cold accumulated in the artificial firn-ice massifs on the surface of the Earth. The application of a long jet sprinkler system makes possible for a day to create the firn-ice massifs with a height of over 10 meters. Relatively small number of sprinklers may be sufficient to freeze for the cold period a quantity of the firn-ice masses weighing millions of tons. Daily freezing productivity is approximately 75 tons of ice in recalculation per 1 degree of the air negative temperature. This method provides accumulation of huge reserves of natural cold, which can be stored for a long period of time with the use of thermal insulation. When freezing the firn-ice masses at the air temperature of −15 °C, 1 ton of firn requires energy of 0.5 kW·h, which is 190 times less than it is necessary for melting 1 ton of ice. The use of artificial firn-ice masses will accelerate the development and introduction of thermogradient power plants, and not only in the marine areas.

Citation: Sosnovsky A.V. Ice energy: prospects for the use of artificial firn-ice masses to generate electricity. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017. 57 (2): 253–260. [In Russian]. doi:10.15356/2076-6734-2017-2-253-260.

Поступила 18 сентября 2016 г. *Принята к печати 2 февраля 2017 г.*

Ключевые слова: ***зимнее дождевание, искусственные фирново-ледяные массивы, преобразование тепловой энергии океана, термоградиентные электростанции.***

Рассмотрен термоградиентный способ выработки электроэнергии на основе перепада температуры воды на поверхности и в глубине океана, отмечены его недостатки, которые можно устранить с помощью природного холода, аккумулируемого в фирново-ледяных массивах. Дана оценка производительности намораживания и расхода энергии на производство искусственного фирна. Определена эффективность разной теплоизоляции ледяного массива для снижения таяния.

Введение

Одна из проблем современности – антропогенное воздействие на окружающую среду, обусловленное использованием ископаемых видов топлива – нефти, газа и угля. Серьёзной проблемой становится истощение этих энергоресурсов, что сильно скажется уже на ближайших поколениях. Для решения или снижения её остроты необходимы поиск, разработка и использование альтернативных источников энергии, которые могли бы обеспечить выработку электроэнергии и снизить вред окружающей среде. В работе [1] отмечается, что в мире возрастает значение децентрализованных природосберегающих низкоинтенсивных энергетических технологий и перехода к постепенному, более широкому использованию возобновляемых источников энергии. Среди них особое направление занимают ресурсы акватории Мирового океана: использование вертикальных перепадов температур вод океана, поверхностных волн, морских течений, приливов, океанских ветров, естественных перепадов солёности, ресурсов биомассы водных растений, а также подводных геотермальных источников.

Потенциальная мощность океанских ресурсов с использованием лишь известных технических систем более чем в 2 раза превышает аналогичный суммарный показатель всей современной энергетики. При этом более половины этой величины приходится на вертикальные термоградиенты. В 1980 г. в США был принят специальный закон об использовании тепловой энергии океана – Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Act of 1980, United States Code, Title 42, Chapter 99. Закон предусматривает придание плавучим тепловым электростанциям юридического статуса судов под американским флагом, выделение целевых субсидий разработчикам оборудования, а также создание специального федерального фонда для страхования опытных демонстрационных установок. Определена процедура выдачи американских лицензий на размещение термоградиентных установок за границами национальных территориальных вод США. К концу 1980-х годов в условиях временного снижения мировых цен на энергоносители интерес к этим проектам несколько снизился. В последнее время термоградиентные установки вновь включены в действующие программы перспективных НИОКР по водородной энергетике США и ряда других стран. По удельным капитальным затратам (1000–2500 дол./кВт) и стоимости производимой электроэнергии (от 4 центов/кВт·ч) проектные варианты американских термоградиентных электростанций вполне сопоставимы с действующими атомными электростанциями.

Наряду с энергией океана, к практически неисчерпаемой возобновляемой энергии относят солнечную радиацию, энергию ветра, биомассы, геотермальное тепло. В данный список можно добавить и природный холод, запасы которого в приземном слое воздуха можно эффективно аккумулировать в искусственных фирново-ледяных массивах. Это обусловлено тем, что ледяной материал можно применять не только для экономии электроэнергии в системах кондиционирования воздуха [2], но и для её выработки, используя перепад температуры между тающим льдом и окружающей средой [3]. Идея использования перепада температур в среде для выработки электроэнергии высказана ещё в XIX в. [4, 5]. В настоящее время в мире существует несколько термоградиентных электростанций, использующих разницу температур на поверхности и в глубинах океана, есть и ряд новых крупных проектов [6–8]. Задача настоящей работы – оценить перспективы использования искусственных фирново-ледяных массивов для аккумуляции природного холода и выработки электроэнергии.

Термоградиентные электростанции

Использовать вертикальный температурный градиент тропического океана для получения электроэнергии впервые предложил французский учёный Д'Арсонваль в 1881 г. [5]. Его ученик – Жорж Клод в 1930 г. построил первую работающую установку по получению электроэнергии из океана на о. Куба мощностью 22 кВт. В развитие теории и практики систем по получению энергии морского градиента ещё больший вклад внесла Япония. В 1970 г. компания Tokyo Electric Power Company (TEPCO) разработала и построила электростанцию закрытого типа на о. Науру мощностью 100 кВт. Пущенная в строй в 1981 г. электростанция производила около 120 кВт электроэнергии, из которых 90 кВт использовалось для нужд самой станции: ¾ выработанной электроэнергии расходовалось главным образом на доставку холодной воды с большой глубины и значительно меньшая часть – на работу других насосов и устройств.

США вплотную занялись исследованиями проектов океанских электростанций в 1974 г., когда на Гавайских островах была основана лаборатория по разработке и тестированию различных способов получения энергии за счёт морского градиента. В 1979 г. недалеко от Гавайских островов начала работу экспериментальная океаническая тепловая электростанция «Мини-OTEC» [5]. Принцип действия такой электростанции показан на рис. 1. При температуре поверхности океана 25–27 °С в трубах испарителя нагревается и закипает аммиак – рабочее тело. Его пары вращают лопасти турбины генератора и вырабатывают электроэнергию. После этого пары аммиака охлаждаются водой с температурой 4 °C, забранной на глубине около 1 км, и конденсируются; затем аммиак опять поступает в испаритель и цикл повторяется. После запуска и тестирования «Мини-ОТЕС» было создано лишь несколько океанских тепловых электростанций, мощность которых варьировала от 1 до 20 МВт.

Освоение тепловой энергии океана входит в национальные программы США, Франции, Японии, Швеции, Индии. Возможно использование энергии воды океана и в арктических широтах [8]. В последнем случае тепловым источником служит вода, а холодным источником – атмосферный воздух; рабочее тело – незамерзающий фреон или раствор хлористого кальция. При разработке термоградиентных электростанций возникает ряд технических проблем, среди которых: подача воды с больших океанских глубин по трубам; установка и крепление этих труб на дне; устойчивая работа труб в условиях неспокойного океана; расход электроэнергии на подъём значительных объёмов воды с больших глубин. Помимо выработки электроэнергии, такая установка сама потребляет электроэнергию в огромных масштабах для работы электронасосов, которые перекачивают воду с целью охлаждения аммиака.

Все источники возобновляемой энергии имеют те или иные недостатки, к которым необходимо приспосабливаться [1]. Среди главных недостатков существующих термоградиентных электростанций: большие энергетические потери на транспорт воды с глубины, позволяющие установкам работать при разности температур не менее 20 °C; сложность подачи воды, ограничивающая объёмы производства; необходимость иметь стартовые энергетические мощности; проблемы, связанные с выделением углекислого газа, растворённого в глубинных слоях океана. Именно из-за этих недостатков выполненные экспериментальные работы по освоению тепловой энергии океана привели к весьма скромным результатам на маломощных установках, работающих с положительным выходом энергии при температурном градиенте не менее 20 °C. Однако главная проблема при работе термоградиентных электростанций заключается в холодной воде, которую необходимо поднимать с глубины более 600 м. Если найти источник холода на поверхности Земли, то многие проблемы по разработке и эксплуатации подобных электростанций будут решены.

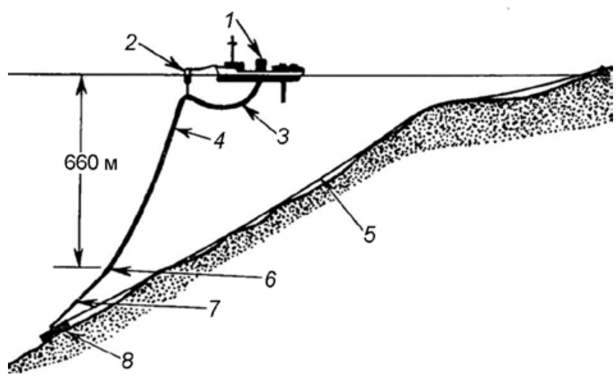

Рис. 1. Экспериментальная американская термоградиентная установка «Мини-ОТЕС». Из работы [6]: *1* – силовые агрегаты, размещённые на переоборудованной транспортной барже ВМС; *2* – поддерживающий буй; *3* – компенсационный прогиб трубопровода из мягкого пластика; *4* – жёсткий полипропиленовый трубопровод подачи холодных вод; *5* – страховой канат якорной системы; *6* – шарнирный узел крепления трубопровода; *7* – якорный канат; *8* – бетонный якорный блок

Fig. 1. American experimental thermogradient installation «Mini-OTEC», after [6]: *1* – power-generating set placed on a re-equipped Navy transport barge; *2* – supporting buoy; *3* – compensating deflection of the soft plastic pipeline; *4* – inflexible polypropylene pipeline supplying cold water; *5* – insurance cable of the anchoring system; *6* – hinged joint for the pipeline fixing; *7* – anchor cable; *8* – concrete anchor block

Источником холода могут быть искусственные фирново-ледяные массивы, намороженные в природных условиях методом факельного льдообразования. В настоящее время этот метод – наиболее эффективен при намораживании больших объёмов ледяного материала. Он реализуется при зимнем дождевании, которое позволяет намораживать миллионы тонн ледяного материала с относительно небольшими энергозатратами [3]. При этом температура тающего льда будет ниже минимальной температуры океанских глубин. Вместо температуры поверхности океана можно использовать температуру атмосферного воздуха с принудительной вентиляцией, а также температуру воды поверхностных водотоков или водоёмов.

Схема работы ледяной термоградиентной электростанции приведена на рис. 2. Отличие

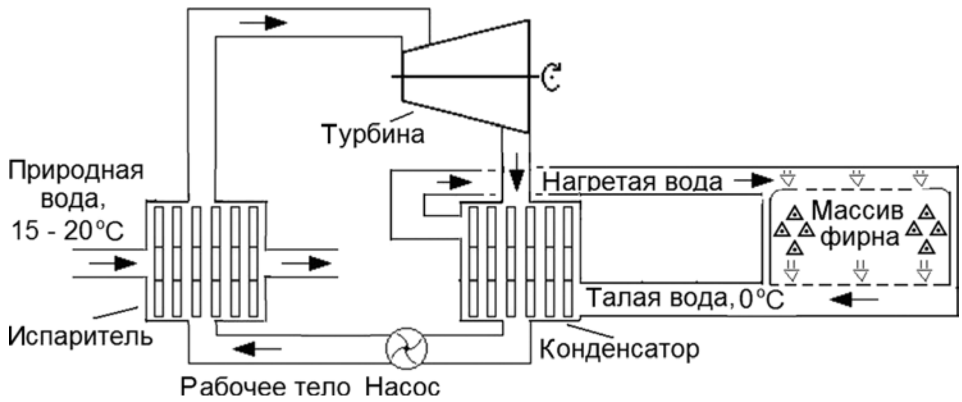

Рис. 2. Схема работы ледовой термоградиентной электростанции
Fig. 2. Operative diagram of an ice thermogradient power plant

ледяной электростанции от океанской состоит в выборе источника охлаждения рабочего тела. Если в океанской термоградиентной электростанции источником охлаждения служит холодная вода с больших глубин, то в ледяной – талая вода из фирново-ледяного массива. Рабочее тело в испарителе нагревается проточной природной водой и испаряется. Газ после испарителя поступает на турбины, где вырабатывается электроэнергия, а затем – в конденсатор, где он превращается в жидкость. Охладителем в конденсаторе выступает талая вода из массива искусственного фирна. После конденсатора нагретая талая вода подаётся на фирновый массив (разбрызгивается на минимальной высоте над фирном), где она охлаждается и пополняется талой водой. Затем цикл повторяется.

Применение зимнего дождевания для аккумуляции природного холода

Высокопроизводительный метод факельного льдообразования для намораживания искусственных фирново-ледяных массивов разработан в Институте географии РАН в 1980-х годах. Метод заключается в применении зимнего дальнеструйного дождевания для формирования капельного факела путём разбрызгивания воды на большую высоту (15–20 м) современными дальнеструйными дождевальными установками. При падении в морозный воздух с температурой ниже −5 °С капли воды полностью или частично замерзают и образуется массив из осколков ледяных оболочек. Незамёрзшая вода фильтруется через пористый ледяной массив и вытекает из зоны намораживания. Количество взвешенной влаги составляет порядка 6–12%. В течение нескольких суток под действием процессов метаморфизма ледяные осколки превращаются в округлые ледяные зёрна диаметром около 1,5 мм и по своим характеристикам идентичны естественному фирну на ледниках.

Отличие метода факельного льдообразования от методов намораживания льда тонкослойным наливом состоит в переносе основного теплообмена с плоскости намораживания в объём капельного факела. Это позволяет значительно увеличить поверхность тепло- и массообмена, эффективно использовать запас холода приземного слоя атмосферы и более чем на порядок повысить интенсивность намораживания. Так, метод тонкослойного налива позволяет получить за сутки слой льда толщиной порядка 0,2 м при температуре воздуха −20 °С и скорости ветра 4 м/с, а факельное намораживание даёт возможность создавать за сутки массив искусственного фирна толщиной до 10 м при плотности 500–600 кг/м^3, что по запасу холода (теплоте плавления полученного ледяного материала) больше в 30 раз. В зависимости от технологии применения зимнего дождевания можно в несколько раз повысить производительность намораживания и монолитного льда плотностью 800–900 кг/м^3. Метод сразу стал использоваться при строительстве ледовых переправ и автозимников и вошёл в ведомственные нормы. Были разработаны теоретические и практические аспекты метода зимнего дождевания [9], некоторые из них защищены авторскими свидетельствами и патентами. Его можно эффективно применять при решении экологических проблем [3].

Производительность намораживания искусственного фирна

Для зимнего дождевания применяют как серийные дождевальные установки ДДН-70 (дождеватель дальнеструйный навесной с дальностью полёта струи 70 м и расходом воды 65 л/с при насадке $d = 55$ мм), так и специально разработанные, в том числе на базе ДДН-70, установки для зимнего дождевания серии «Град». Экспериментальные и теоретические исследования позволили установить следующую зависимость для расчёта доли льда p, образующегося при факельном льдообразовании с дождевальной установкой ДДН-70, имеющей насадку $d = 55$ мм:

$$p = 0{,}01(3 + 1{,}2|T_{вз} - T_0|)(0{,}0875 + 0{,}026v), \text{ доли ед.}, \quad (1)$$

где $T_{вз}$ – температура атмосферного воздуха, °C; T_0 – температура замерзания воды, °C; v – скорость ветра, м/с.

Факельное льдообразование применяется при температуре атмосферного воздуха ниже −5 °C, так как при более высоких температурах льдообразование происходит в основном на намораживаемой поверхности с образованием ледяной шуги из переохлаждённых в воздухе капель воды. При небольших отрицательных температурах воздуха используются насадки меньшего диаметра, при которых растёт давление на выходе и за счёт уменьшения среднего размера капель повышается доля льда в капельном факеле, хотя при этом и снижается расход воды. При безветренной погоде дождевальная установка работает по сектору или по кругу с угловой скоростью 0,2 об/мин. Это приблизительно соответствует скорости ветра 5 м/с, при которой скорость вентиляции факела составляет около 1 м/с [10]. Из формулы (1) при скорости ветра 5 м/с получим зависимость для расчёта суточного объёма намораживания искусственных фирново-ледяных массивов:

$$Q = 0{,}01G(3 - 1{,}2T_{вз}), \text{ т}, \quad (2)$$

где $G = 5616$ м^3/сут. – расход воды дождевальной установкой.

После падения замерзающих капель на поверхность земли продолжается промерзание незамёрзшей взвешенной воды за счёт теплообмена с воздухом, хотя интенсивность намораживания на горизонтальной поверхности падает из-за относительно небольшой поверхности теплообмена. Формула (2) не учитывает теплообмен поверхности фирново-ледяного массива с воздухом, поэтому расчёты по этой формуле занижают объём намораживания ледяного материала. Основной параметр, определяющий производительность намораживания искусственных фирново-ледяных массивов (кроме технических характеристик дождевальной установки), – температура воздуха. На рис. 3 представлен массив искусственного фирна максимальной высотой 6,7 м, намороженный при температуре атмо-

Рис. 3. Массив искусственного фирна высотой 6,7 м, намороженный за 19 часов непрерывной работы дождевателя ДДН-70 при температуре воздуха −17 °C
Fig. 3. A massif of artificial firn in 6.7 m height, having been frozen for 19 hours of continuous work of the Sprinkler DTT-70 at the air temperature of −17 °C

сферного воздуха −17 °С за 19 часов непрерывной работы дождевальной установки ДДН-70. Расчёты показали, что при работе одной дождевальной установки ДДН-70 [11] производительность намораживания льда в холодный период изменяется от 10–20 тыс. т в южных регионах России до 500 тыс. т в наиболее холодных.

Защита массивов искусственного фирна от естественного таяния

Многометровые массивы искусственного фирна нуждаются в защите от естественного таяния в период с положительными температурами воздуха. Оценки показывают, что в юго-западных районах России интенсивность таяния в апреле составляет 2,7 см воды за сутки [12]. В мае такая интенсивность таяния соответствует 65° с.ш. на Европейской территории России и 62° с.ш. в Западной Сибири, где в это время может растаять до 1,6 м искусственного фирна. В июне интенсивность таяния на 60-й параллели на ЕТР и в Западной Сибири составляет порядка 13,3 см воды за сутки (8 м фирна за месяц), а на 67° с.ш. вдвое ниже – 6,7 см воды за сутки; в июле на 60–67° с.ш. интенсивность таяния – 16–17 см воды за сутки (10 м фирна); в августе на этих широтах – 8–11 см воды за сутки (6 м фирна), а в сентябре в Западной Сибири – 2–3 см воды за сутки (1,5 м фирна); в октябре на этих широтах уже возможно намораживание льда.

Для сохранения искусственных фирново-ледяных массивов на весь период с положительными температурами воздуха требуется применение теплоизоляции. Чтобы оценить эффективность и толщину слоя теплоизоляции, рассмотрим теплообмен между атмосферой и слоем теплоизоляции. Его величину можно определить по формуле

$$q_и = \alpha(T_{вз} - T_и),$$

где $q_и$ – тепловой поток; α – коэффициент теплоотдачи; $T_{вз}$ и $T_и$ – соответственно температура воздуха и поверхности слоя теплоизоляции.

Сравнивая теплопоток по этой формуле с теплопотоком через слой теплоизоляции, задаваемый при квазистационарном распределении температуры формулой

$$q_и = \lambda_и(T_и - T_0)/h_и,$$

и исключая величину $T_и$, получим тепловой поток через слой теплоизоляции:

$$q_и = \alpha(T_{вз} - T_0)/(1 + \alpha R_и),$$

где $R_и = h_и/\lambda_и$ – термическое сопротивление слоя теплоизоляции; $h_и$ – толщина слоя теплоизоляции; $\lambda_и$ – коэффициент теплопроводности слоя теплоизоляции; $T_0 = 0$ °С – температура плавления льда.

Тогда снижение интенсивности таяния искусственного фирна под слоем тепловой изоляции определяется отношением

$$q_и/q_0 = (1 + \alpha R_и)^{-1},$$

где $q_0 = \alpha(T_{вз} - T_0)$ – поток тепла в случае отсутствия слоя теплоизоляции при $R_и = 0$ м^2/(Вт·К).

Для оценок можно принять эффективный коэффициент теплоотдачи по следующей формуле [13]: $\alpha = 10{,}7 + 7{,}7v$, Вт/(м^2·К), где v – скорость ветра, м/с. Если принять за слой теплоизоляции супесь влажностью 25% с коэффициентом теплопроводности 1,6 Вт/(м·К), то при $v = 2$ м/с получим $k = 1/(1 + 15h_и)$. Приблизительно такая же зависимость получается по полуэмпирической формуле снижения скорости таяния ледника под слоем грунтовой морены толщиной $h_{гр}$, м [12]: $A_h/A_0 = 1{,}3/(20h_{гр} + 1)$, где A_h, A_0 – соответственно скорость абляции при наличии морены и её отсутствии. Отличие отношения $q_и/q_0$ и A_h/A_0 составляет 8% при $h_{гр} = 0{,}1$ м и 2–4% при $h_{гр} = 0{,}2$–$0{,}3$ м.

К одному из эффективных теплоизоляционных материалов относится поролон. Его коэффициент теплопроводности не превышает 0,04 Вт/(м·К). Для слоя поролона толщиной 0,1 м при скорости ветра 2 м/с получим снижение интенсивности таяния в 65 раз. В районах Западной Сибири на 65° с.ш. таяние за период с положительными температурами воздуха составит порядка 22 м искусственного фирна плотностью 500 кг/м^3 [11]. При теплоизоляции слоем поролона толщиной 10 см растает порядка 35 см искусственного фирна, что при высоте массива 10 м не превышает 4% его массы. Дождевальные дальнеструйные установки приспособлены для внесения в дождевальную струю различных добавок, в качестве которых на конечной стадии намораживания можно использовать измельчённый теплоизолятор. В процессе таяния он будет аккумулироваться на поверхности фирново-ледяного массива, бронировать его и создавать слой теплоизоляции.

Эффективность применения искусственных фирново-ледяных массивов для выработки электроэнергии

При применении зимнего дождевания могут использоваться как стационарные дождевальные установки, работающие от электрической сети, так и передвижные насосные станции или дождеватели, агрегированные с трактором. В последнем случае при формировании искусственного фирна расход дизельного топлива на получение 1 т фирна зависит от температуры воздуха. Эксперименты показали, что за 19 часов работы дождевальной установки ДДН-70 было израсходовано 200 л дизельного топлива и при температуре воздуха −17 °С был сформирован искусственный фирново-ледяной массив массой 1500 т (см. рис. 3). Таким образом, на получение 1 т фирна расходуется 0,13 л дизельного топлива при плотности 840 кг/м^3 или 0,16 кг условного топлива (топливо с теплотой сгорания 7000 ккал/кг), что в пересчёте составит 0,46 кВт·ч. При температуре воздуха −10 °С производительность намораживания снижается и для получения 1 т фирна потребуется 0,28 кг условного топлива. Для плавления 1 т воды необходимо 334 МДж, что соответствует 94 кВт·ч, тогда как для замерзания 1 т воды при зимнем дождевании и температуре воздуха −17 °С требуется в 200 раз меньше энергии.

Коэффициент полезного действия (КПД) термоградиентной электростанции с использованием искусственного фирна рассчитывается по формуле КПД цикла Карно [7]: КПД = 100 $(T - T_0)/T$, где T – максимальная температура воды или воздуха, К; T_0 = 273 К – температура плавления льда; при T = 288 (293) К получим КПД = 5(7)%. В действительности, КПД станции будет несколько меньше, так как часть энергии будет затрачена на работу насосов для прокачки рабочего тела и воды. Массив искусственного фирна толщиной 10 м на площади 2 га (масса 10^5 т) намораживается одной дождевальной установкой за холодный период при сумме отрицательных градусо-суток −1300 °С. При КПД фирново-ледяной термоградиентной электростанции 5% получим выработку электроэнергии около 500 тыс. кВт·ч. При этом затраты энергии на получение такой массы льда при зимнем дождевании составят порядка 46(81) тыс. кВт·ч при температуре воздуха −17(−10) °С. Получать электроэнергию зимой можно по тому же принципу – за счёт перепада температур между водой и воздухом, например, используя принцип тепловых труб. Поэтому обычный водоём может служить источником получения электрической энергии как в летний, так и зимний период. В весенний и осенний периоды целесообразна консервация ледяного массива ввиду небольшого перепада температур между льдом и воздухом. Применение искусственных фирново-ледяных массивов в системе термоградиентных электростанций позволит снизить капитальные затраты на 1–2 порядка и значительно уменьшить текущие расходы электроэнергии при работе таких станций.

Заключение

Высокопроизводительный метод факельного льдообразованиия позволяет создавать фирново-ледяные массивы высотой более 10 м и массой в миллионы тонн при работе небольшого числа дождевальных установок в холодный период. Это даёт возможность аккумулировать огромные запасы природного холода, которые можно сохранять длительное время с помощью теплоизоляции. Анализ недостатков термоградиентных электростанций, связанных с техническими проблемами и энергетическими тратами на подъём большого объёма воды с океанских глубин, показывает, что их можно избежать, используя природный холод, аккумулированный в искусственных фирново-ледяных массивах на поверхности земли. Применение искусственных фирново-ледяных массивов ускорит развитие и внедрение термоградиентных электростанций, не привязываясь к морским акваториям, тем более что необходимы акватории с большими глубинами. Ледяные термоградиентные электростанции можно размещать вблизи от потребителя электроэнергии.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке научных проектов Института географии РАН: Направление 79. № 01201352477.

Acknowledgments. The work was supported by the scientific projects of the Institute of Geography, Russian Academy of Sciences: Theme 79. № 01201352477.

Литература

1. *Корнеев А.В.* Энергетический баланс будущего: борьба за зоны океанических термоградиентов / Науч. докл. на русск. языке, объём 0,4 а.л. Представлен на Международном форуме «Энергетика будущего», Институт комплексных исследований в энергетике, Москва, 16–18 ноября 2010 г. http://www.myshared.ru/slide/398563/
2. *Сосновский А.В.* Искусственный фирн и системы кондиционирования воздуха // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2014. № 12 (156). С. 78–81.
3. *Сосновский А.В., Ходаков В.Г.* Искусственное льдообразование в природных условиях для решения экологических проблем // МГИ. 1995. Вып. 79. С. 3–6.
4. *Крыжановский Р.А.* Ресурс будущего: Морская вода. Эффективность освоения. М.: Мысль, 1985. 174 с.
5. *Смирнов Н.П.* Геоэкология. СПб.: изд. Российского гос. гидромет. ун-та, 2006. 307 с.
6. *Корнеев А.В.* По разные стороны океана: США – Япония: борьба за природные ресурсы Тихого океана. М.: Мысль, 1985. 130 с.
7. Электронный ресурс: http://www.exergy.se/ftp/cng97ot.pdf
8. Электронный ресурс: http://nnhpe.spbstu.ru/preobrazovanie-teplovoj-energii-okeana/
9. *Сосновский А.В.* Искусственные фирново-ледяные массивы и перспективы их использования для защиты водных ресурсов от загрязнения // Лёд и Снег. 2011. № 2 (114). С. 135–142.
10. *Сосновский А.В.* Влияние скорости ветра на процесс льдообразования в факеле искусственного дождя // МГИ. 1986. Вып. 55. С. 225–230.
11. *Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В.* Физико-географические закономерности формирования искусственных фирново-ледяных массивов // Лёд и Снег. 2014. № 2 (126). С. 113–120.
12. *Ходаков В.Г.* Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР. М.: Наука, 1978. 196 с.
13. *Кудряшов Н.Т.* Экспериментальное исследование тонкослойного намораживания льда // Холодильная техника. 1959. № 3. С. 4–10.

References

1. *Korneev A.V. Energeticheskiy balans budushchego: bor'ba za zony okeanicheslikh termogradientov.* The energy balance of the future: the struggle for oceanic areas of thermo-gradients. International Forum «Energy of the Future». Institute of Integrated Research in Energy, Moscow, 16–18 November 2010. [In Russian]. http://www.myshared.ru/slide/398563/
2. *Sosnovskiy A.V.* Artificial firn and systems air conditioning. *Santekhnika Otoplenie. Konditsionirovanie.* Plumbing. Heating. Air Conditioning. 2014, 12 (156): 78–81. [In Russian].
3. *Sosnovskiy A.V., Khodakov V.G.* Artificial ice formation in natural conditions for the solution of environmental problems. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1995, 79: 3–6. [In Russian].
4. *Kryzhanovskiy R.A. Resurs budushchego. Morskaya voda. Effektivnost' osvoeniya.* The resource of the future. Sea water. The effectiveness of development. Moscow: Mysl', 1985: 174 p. [In Russian].
5. *Smirnov N.P. Geoekologiya. Uchebnoe posobie.* Geoecology. Tutorial. Sankt-Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2006: 307 p. [In Russian].
6. *Korneev A.V. Po raznye storony okeana: S.SH.A. – Yaponiya: bor'ba za prirodnye resursy Tikhogo okeana.* On opposite sides of the ocean: the USA – Japan: the struggle for natural resources of the Pacific Ocean. Moscow: Mysl', 1985: 130 p. [In Russian].
7. http://www.exergy.se/ftp/cng97ot.pdf
8. http://nnhpe.spbstu.ru/preobrazovanie-teplovoj-energii-okeana/
9. *Sosnovskiy A.V.* Artificial firn-ice masses and the prospects for their use to protect water resources from pollution. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2011, 2 (114): 135–142. [In Russian].
10. *Sosnovskiy A.V.* Effect of wind speed on the process of ice formation in the area of artificial rain. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1986, 55: 225–230. [In Russian].
11. *Sosnovskiy A.V., Nakalov P.R., Nenashev S.V.* Physical-geographical aspects of formation of artificial firn-ice massives. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2014, 2 (126): 113–120. [In Russian]
12. *Khodakov V.G. Vodno-ledovyi balans rayonov sovremennogo i drevnego oledeneniya SSSR.* Water and ice balance of the areas of modern and ancient glaciation of the USSR. Moscow: Nauka, 1978: 196 p. [In Russian].
13. *Kudryashov N.T.* Experimental study of thin layer of the ice freezing. *Kholodil'naya tekhnika*. Cooling technology. 1959, 3: 4–10. [In Russian].