

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОДЛЕНИЯ СРОКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОЗИМНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Е. Ю. Локтионов¹, Е. С. Шараборова², А. В. Клоков¹, А. В. Бахмадов¹, А. А. Коршунов³

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Москва, Российская Федерация)

² École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Лозанна, Швейцария)

³ Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2023 г.

Для цитирования

Локтионов Е. Ю., Шараборова Е. С., Клоков А. В. и др. О возможности продления сроков эксплуатации автозимников с использованием возобновляемых источников энергии // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 4. — С. 447—455. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-447-455.

В последние годы изменение климата не только значительно уменьшило сроки эксплуатации зимников, но и сделало их малопредсказуемыми. Это вынуждает увеличивать интенсивность перевозок, часто в ущерб безопасности, или внезапно останавливать их, оставляя машины и оборудование без использования в течение длительного времени и срывая сроки выполнения проектов. Поэтому продление сроков эксплуатации зимников, снижение зависимости от местных метеоусловий — очень актуальная задача. Для ее решения рассмотрены возможности применения ранее предложенного авторами способа термостабилизации мерзлых грунтов с использованием солнечных батарей и тепловых насосов и оценены сопутствующие затраты. Расчеты показали, что возможно существенное продление срока эксплуатации зимников без покрытия вплоть до круглогодичного в случае использования максимально облегченной дорожной одежды без создания подушки. Построена экспериментальная установка. Такой подход может способствовать решению целого комплекса проблем устойчивого развития арктических территорий за счет создания транспортно-энергетических коридоров.

Ключевые слова: зимник, термостабилизация, фотоэлектрические модули, тепловые насосы, искусственное замораживание, транспортно-энергетический коридор.

Введение

Доля дорог с твердым покрытием в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) составляет около 14%. В стране ежегодно строится порядка 175 регулярных автозимников общей протяженностью почти 30 тыс. км. Самый длинный из них проходит по льду реки Енисей — около 1500 км. Для 90% территории Якутии, где 60% местных дорог относятся именно к автозимникам, — это единственный наземный способ связи с «большой

землей», по ним перевозится около 80% грузов. Строительство автозимников и ледовых переправ регламентируется ГОСТ Р 58948-2020. Автозимники делают шириной не менее 6 м, при этом на разъездах длиной не менее 50 м, расположенных через каждые 500 м или в пределах прямой видимости в горах, она должна составлять не менее 8 м. Истинная протяженность зимников с учетом всех временных технологических, разовых и местных не поддается оценке. Зачастую именно для них критически важно продлить срок существования, чтобы не остаться «на второй год» с реализацией какого-либо проекта.

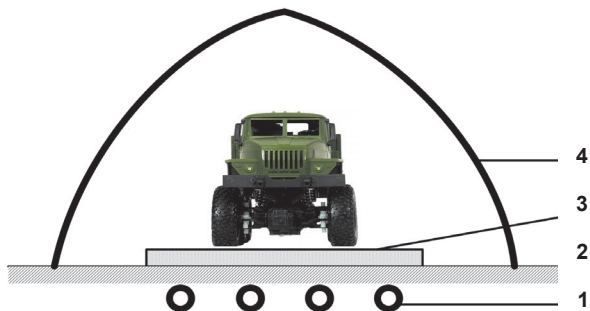


Рис. 1. Принципиальная схема устройства автозимника: 1 – грунтовые зонды, 2 – уровень естественного грунта, 3 – дорожная одежда, 4 – солнечные батареи. Составлено авторами

Fig. 1. Schematic diagram of the winter road structure: 1 – soil probes, 2 – natural ground level, 3 – road pavement, 4 – solar panels. Compiled by the authors

Строительство зимников начинают при глубине снежного покрова от 10 см. На холодном севере Якутии они служат с октября по май (иногда июнь). С учетом климатических изменений и погодных аномалий эти сроки все чаще нарушаются [1]. Так, в 2017 г. только к началу февраля смогли построить зимник хотя бы для малотоннажного транспорта до села Андрюшкино (800 жителей) на северо-востоке Якутии, где к этому времени дефицит топлива уже вынудил отключать электричество и понижать температуру в системе отопления. Лимитирующим фактором являлись ледовые переправы на трассе. Сокращение периода ледостава к концу текущего столетия ожидается до 40—50%, кроме того, будет сокращаться средняя толщина льда (на 30—40%, что для Чукотки эквивалентно 50 см) — все это будет способствовать значительному сокращению сроков эксплуатации зимников, а значит, сократит и без того низкую транспортную доступность континентальных районов АЗРФ [2].

Хотя зимники в строительстве и содержании обходятся намного дешевле традиционных автодорог, ежегодные затраты все равно исчисляются многими десятками тысяч долларов за километр [3]. Так, строительство 160 км зимника специального назначения в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) обошлось в 42 тыс. долл./км, а его содержание — еще в 20 тыс. долл./км при длительности эксплуатации четыре месяца в году. Для сравнения: только материал для отсыпки традиционной автодороги в ЯНАО обходится в 1—1,2 млн долл./км (полная стоимость круглогодичной дороги Салехард — Надым составила около 2,4 млн долл./км, при этом асфальтом покрыта лишь ее половина, и дорога функционирует с различными пропускными ограничениями), а ее содержание, включая текущий ремонт, обходится в 50,7 тыс. долл./км (2022 г.). Наибольшее сокращение сроков эксплуатации автозимников, причем практически на всей территории округа, происходит в ЯНАО — в среднем

более 10 дней. Причем за этим средним значением скрываются отклонения в месяц (т. е. 25% срока эксплуатации) и более в отдельные годы. Если раньше зимник Нарьян-Мар — Усинск функционировал с декабря до апреля, то в 2021 г. для всех видов транспорта он был открыт только 1 февраля (с ограничениями — с 16 января) и проработал до 10 апреля, при этом стоимость его обустройства и содержания составила около 20 тыс. долл./км.

Таким образом, если нормировать стоимость строительства и обслуживания зимников на срок их эксплуатации, получится 7—15 тыс. долл./км·мес), или 84—180 тыс. долл./км·год), если бы они работали круглогодично. Если считать сроками полной амортизации дороги Салехард — Надым 20 лет для покрытия и 50 лет для насыпи, то с учетом ее обслуживания расходы составят 135 тыс. долл./км·год). С одной стороны, это меньше аналогичного показателя для зимников в ЯНАО, с другой — при учете высоких ставок дисконтирования соотношение показателей изменится. При этом суммарный экономический и социальный эффекты от круглогодичной дороги, несомненно, будут выше, чем от сезонной, особенно с учетом изменения климата [4].

Для сооружения временных дорог, эксплуатируемых в теплое время года, используют композитные мобильные дорожные плиты [5]. Стоимость такой дороги составляет от 100 до 275 долл./м² (без учета доставки и работ по монтажу), или 0,6—1,65 млн долл./км в зависимости от допустимой нагрузки (толщины плит). Данных о сроках службы таких плит нет, но вполне обоснованно предполагать, что для долговременных сооружений со сколько-нибудь интенсивным движением они не годятся. Хотя такие дорожные покрытия могут укладываться на не подготовленное основание, это не решает всех проблем при пересечении болотных массивов (невозможно для болот III типа, сильно ограничено для II типа). Обходы болот иногда требуют существенно удлинения даже зимней трассы, поскольку промерзают обводненные болота в течение длительного времени. Преимущества мобильных плит по сравнению с обычной дорогой: быстрота строительства (0,5 км/сут), возможность разобрать и перевезти в другое место; по сравнению с железобетонными дорожными плитами — втрое меньшая масса, околонулевая плавучесть.

Таким образом, существует значительная потребность в поиске новых экономически оправданных способов строительства автодорог на малонаселенных северных территориях. В данной работе мы рассматриваем альтернативный метод продления сроков эксплуатации зимников и обустройства облегченных дорог с низкой интенсивностью движения, основанный на искусственном замораживании грунта с использованием тепловых насосов, питаемых от солнечных батарей. Такой подход может способствовать решению целого комплекса проблем устойчивого развития территорий АЗРФ.

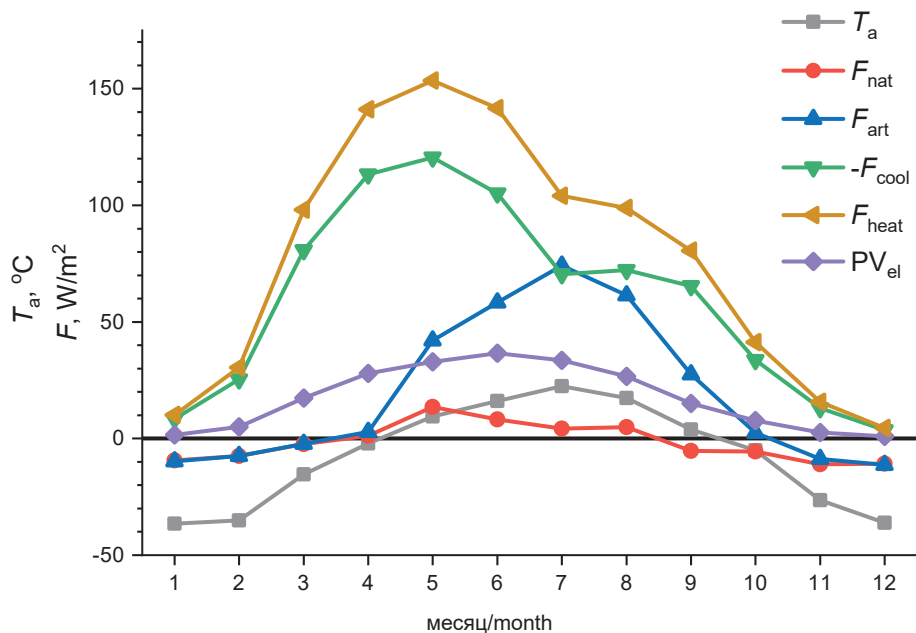


Рис. 2. Температура воздуха T_a и результаты расчета теплового потока в грунт на глубине залегания грунтовых зондов (20 см) для естественных условий F_{nat} и в случае реализации предлагаемой системы F_{art} , а также удельной выработки электроэнергии солнечными батареями PV_{el} , холодильной F_{cool} и тепловой F_{heat} мощности в условиях Якутска. Составлено авторами с использованием первичных данных о климате из [9–11] на основе расчетной методики, приведенной в [6]

Fig. 2. Air temperature T_a and calculated heat flux into the ground at the depth of probes (20 cm) for natural conditions F_{nat} and in case of the proposed system implementation F_{art} , as well as the specific electricity generation from solar panels PV_{el} , refrigeration F_{cool} and thermal F_{heat} capacity for Yakutsk. Compiled by the authors using primary climate data from [9–11] based on the calculation method presented in [6]

Исходные данные и методы исследования

Принципиальная схема системы термостабилизации [6] приведена на рис. 1. Общий смысл заключается в том, чтобы экранировать дорожную одежду от попадания солнечного излучения [7], снижая таким образом тепловую нагрузку на нее [8], с помощью ограждающих конструкций с интегрированными в них солнечными модулями. Возможные конструктивные особенности обсуждаются в следующем разделе.

Моделирование выполнялось для условного болота (10 м торфа с влажностью 3,47, что соответствует болоту III типа) для климатических условий в Норильске и Якутске. Метеорологические данные, используемые в расчетах, взяты из [9–11]. Моделирование выполнялось в программе Frost3D (<https://frost3d.ru/>), разработанной для прогнозирования состояния и проектирования строений на вечной мерзлоте с граничными условиями третьего рода. Подробности методики расчетов приведены в [6]. Сначала было выполнено моделирование температурного поля для естественных условий. Под естественными условиями понимается случай без системы термостабилизации. В таком случае результаты моделирования сравниваются с результатами измерений на выбранной площадке. В случае с болотом оценивали толщину сезонно талого слоя и сопоставляли ее с результатами измерений на выбранной площадке. Также оценива-

ли изменение температуры грунта в течение всего периода моделирования, которое не должно было превышать разницу в $0,5^{\circ}\text{C}$. Затем моделировали охлаждение дорожной одежды трубами грунтового теплообменника из сшитого полиэтилена (PE-X или PE-RT) диаметром 25 мм с толщиной стенки 2 мм, расположенными на глубине 20 см с шагом 50 см. При моделировании охлаждающего контура контролировали предотвращение проникновения тепла вглубь грунта — формирование устойчивого запирающего слоя. Также принималась во внимание компоновка системы, чтобы трубы грунтового теплообменника не лежали на поверхности и не затрудняли движение транспорта. Толщина снежного покрова на дорожном полотне принималась вдвое меньшей, а плотность — вдвое большей, чем по сторонам от дороги; значения же этих величин по сторонам от дороги принимались в соответствии с метеоданными. Так, для Якутска: толщина снежного покрова на дорожном полотне — 28–157 мм, плотность — 220–360 кг/м³; вне дорожного полотна — 56–314 мм и 110–180 кг/м³, а для Норильска — 32–108 мм, 313–700 кг/м³ и 50–217 мм, 157–400 кг/м³ соответственно [9–11].

Результаты расчета тепловых потоков в грунт на глубине залегания грунтовых зондов (20 см) для естественных условий F_{nat} и в случае реализации предлагаемой системы F_{art} , а также удельной выработки электроэнергии солнечными батареями PV_{el}

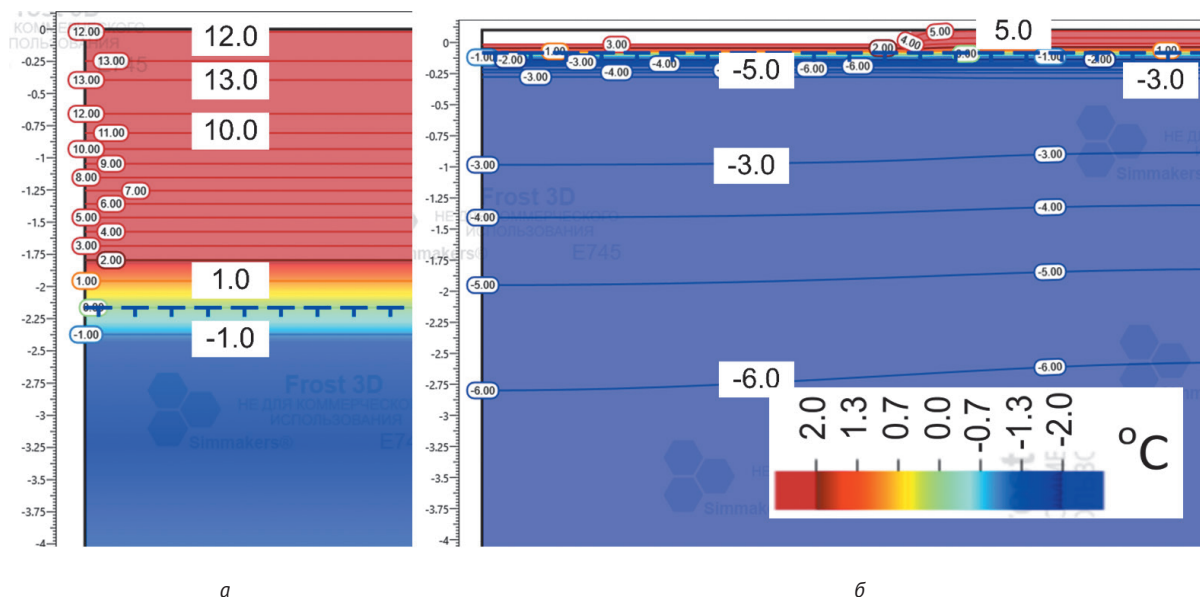


Рис. 3. Результаты расчетов температуры грунта для Якутска (сентябрь): а – естественные условия, б – система термостабилизации без дорожной плиты (слева) и с дорожной плитой 100 мм (справа). Составлено авторами
 Fig. 3. Results of soil temperature calculations for Yakutsk (September): а – natural conditions, б – thermal stabilization system without road slab (left) and with 100 mm road slab (right). Compiled by the authors

при КПД преобразования 15%, холодильной F_{cool} и тепловой F_{heat} мощности (при зависящем от разницы температур воздуха и грунта коэффициенте преобразования теплового насоса) в условиях Якутска приведены на рис. 2. Следует отметить, что это осредненные за соответствующий месяц параметры. Пик холодильной мощности приходится на апрель, поскольку в этот месяц уже высока инсоляция, но еще холодный воздух и наличие снежного покрова позволяют очень эффективно охлаждать грунт. В июле — наиболее тяжелом для работы системы термостабилизации месяце — удельная холодильная мощность примерно равна тепловому потоку, поступающему в грунт при равенстве защищаемой поверхности и площади горизонтальных солнечных батарей.

Дорожное полотно представляло собой композитную мобильную дорожную плиту со свойствами материала, соответствующими свойствам асфальтобетона по СП 121.13330-2019 [12]. Дорожные плиты также служат защитой труб грунтового теплообменника. Уровень солнечной радиации принимался равным 5% суммарного показателя для горизонтальной поверхности с дополнительным учетом альbedo дорожной одежды 25%, альbedo снега — 90%. Скорость ветра была снижена до 30% значений, получаемых на метеостанциях [9—11], как следствие эффекта экранирования. Расчет проводился для условного периода с 15 сентября 2016 г. по 15 декабря 2024 г. Теплообмен в трубах грунтового теплообменника рассчитывался исходя из уровня солнечной радиации, площади солнечных батарей, площади теплообмена и теплоперепада, КПД солнечных батарей принимался равным 10%,

COP (коэффициент преобразования энергии) теплового насоса — 4,3.

Расчет теплообмена в трубах проводили по следующему сценарию. Инсоляцию умножали на КПД солнечных панелей и площадь поверхности, покрываемой ими, это дает количество энергии для питания теплового насоса. Далее это значение умножали на EER (холодильный коэффициент $EER = COP - 1$) теплового насоса, получая оценку средней располагаемой холодильной мощности. Окончательно для получения значений теплообмена в грунтовом теплообменнике холодильную мощность необходимо отнести к площади труб и теплоперепаду. Полученное значение с размерностью Вт/(м²·К) накладывалось в качестве граничных условий, как для случая с COY (сезонные охлаждающие устройства). Температура теплоносителя в трубах поддерживалась на уровне -7,5°C. Для Якутска грунтовой теплообменник работал с марта по октябрь, аналогично для Норильска. В процессе моделирования основной задачей была необходимость формирования устойчивого запирающего слоя и поддержания его в условиях всего периода эксплуатации дороги.

Результаты расчетов и их обсуждение

Результаты расчетов приведены на рис. 3 и 4. Прежде всего, видно радикальное сокращение сезонно-талого слоя (СТС) по сравнению с естественными условиями — фактически болото остается в замороженном состоянии. Для Якутска СТС уменьшается до 9 см, а для Норильска — до 7 см. Прочность на сжатие и изгиб обводненного торфа зависит от температуры (растет с увеличением) и от времени (уменьшается). В итоге можно с запасом принимать

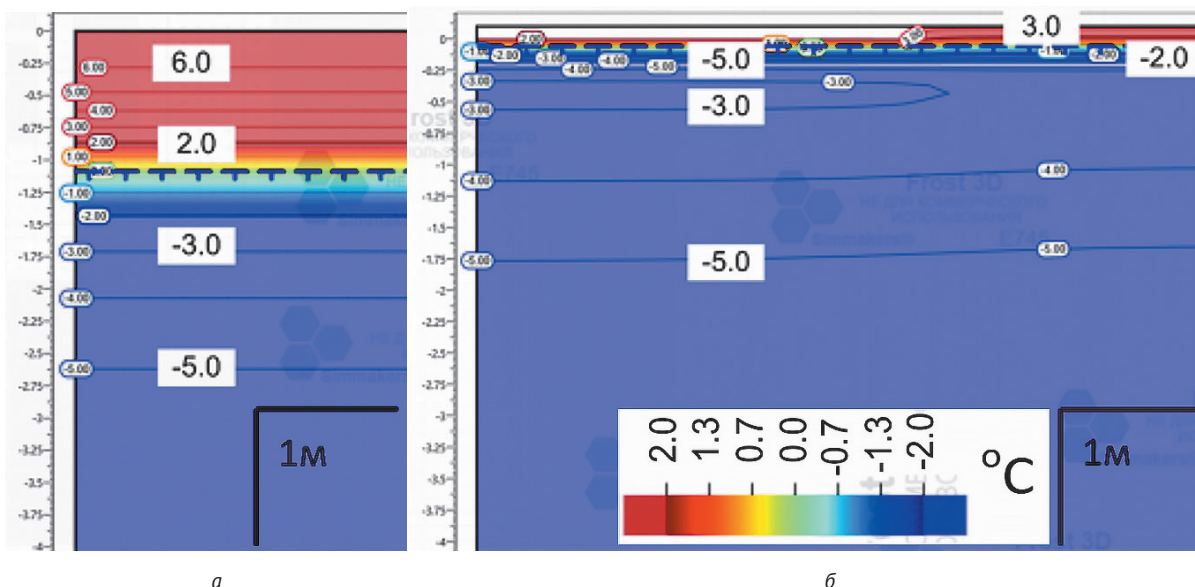


Рис. 4. Результаты расчетов температуры грунта для Норильска (сентябрь): а – естественные условия, б – система термостабилизации без дорожной плиты (слева) и с дорожной плитой 100 мм (справа). Составлено авторами
 Fig. 4. Results of soil temperature calculations for Norilsk (September): а – natural conditions, б – thermal stabilization system without road slab (left) and with 100 mm road slab (right). Compiled by the authors

значения, соответствующие началу кристаллизации воды при 0°C, для сжатия и изгиба 4 и 2 МПа соответственно [13], что значительно выше удельного давления на грунт колесного транспорта, достигающего 0,4 МПа.

Движение автотранспорта по настолько протаявшему грунту возможно, однако для увеличения пропускной способности трассы и снижения расхода горючего желательно применять дорожную одежду, например, из композитных плит минимальной толщины. Как видно из рис. 3б и 4б, наличие даже толстой плиты незначительно меняет распределение температур по глубине.

В зависимости от направления трассы на локальном участке высота ограждений из солнечных модулей может отличаться по разные ее стороны. Их минимальная высота определяется необходимостью обеспечить затенение дорожной одежды в период эксплуатации (определяется максимальным углом подъема солнца над горизонтом), а максимальная — обеспечением достаточной выработки электроэнергии для питания холодильной машины. Значительную проблему представляет обеспечение стойкости вертикальных конструкций большой площади к ветровым нагрузкам. Демонтаж солнечных модулей в зимнее время лишь отчасти решает эту проблему, но увеличивает затраты на обслуживание. Более рациональной выглядит автоматическая ориентация солнечных модулей вдоль ветра при его усилении, например, с использованием принципа балансирного судового руля.

Следует также иметь в виду сложность создания основания для ограждения из солнечных модулей, поэтому наиболее целесообразным может ока-

заться создание куполообразной конструкции, что позволит также экранировать атмосферные осадки [14]. При этом конструкция может состоять из арок с протянутыми между ними тросами, несущими на себе гибкие солнечные модули. Это позволит не только облегчить конструкцию, но и повысить ее стойкость к ветровым нагрузкам, исключить возможность падения жестких и тяжеловесных предметов на трассу в случае нештатных ситуаций. Проблему также будет представлять снегонакопление внутри такого тоннеля, особенно при поворотных солнечных модулях. Хотя ожидается, что снега будет накапливаться меньше, чем в естественных условиях, и это будет способствовать снижению затрат на обслуживание зимника. При использовании дорожных плит, когда потребность в экранировании солнечного излучения снижается, солнечные модули можно интегрировать в снегозащитные сооружения.

Также солнечные модули могут быть использованы на обычных автодорогах для выполаживания откосов насыпи [15] до соотношения уклона порядка 1:10, возможно, даже меньше с учетом снижения коэффициента трения по сравнению с обычным грунтом. Такие сооружения, энергия от которых может быть использована для термостабилизации грунтов в основании летом, зимой будут способствовать уменьшению отложений снега.

Для конфигурации, приведенной на рис. 1, площадь солнечных батарей составляет до 15 м²/м (установленная мощность современных солнечных модулей составляет до 230 Вт/м²), это значит, что будет вырабатываться до 1 МВт·ч/(м·год) излишков электроэнергии, т. е. по суммарной выработке



Рис. 5. Общий вид прототипа системы термостабилизации дорожной насыпи автозимника. Составлено авторами
 Fig. 5. General view of the prototype system for thermal stabilization of the winter road embankment. Compiled by the authors

1 км эквивалентен годовому потреблению поселения с 400 жителей. Важно отметить, что максимум использования энергии для охлаждения дороги приходится на месяцы минимальной потребности в ней у населения. При себестоимости электроэнергии даже 0,7 долл./кВт·ч (для поселений с доставкой ГСМ только зимником она может превышать и 2 долл./кВт·ч), доход от ее утилизации составит 700 тыс. долл./км·год. Эта энергия может быть использована и для электротранспорта, в том числе передаваться на него в процессе движения.

В осеннее время скорейшему установлению зимнего пути мешает недостаточно быстрое охлаждение грунта и воды, а негативное влияние осадков и солнечного излучения (как и его доступность для генерации энергии) минимально. Поэтому для питания холодильной машины, особенно осенью, могут и должны быть использованы ветроэнергетические установки. Реки вообще наиболее существенным образом ограничивают сроки существования зимников, поэтому при продлении сроков эксплуатации придется организовывать паромные переправы. При наличии доступной электроэнергии целесообразно для этого использовать беспилотные электрические паромы.

Экспериментальная установка

На учебной базе Северного (Арктического) федерального университета им. М. В. Ломоносова «Бабонегово» (Архангельск) создан прототип системы термостабилизации дорожной насыпи автозимника. Было решено совместить традиционно используемые слабонаклонные СОУ как более прочные, чем пластиковые трубы, грунтовые зонды. Кроме того, в случае их разгерметизации антифриз не проникнет в грунт, делая его незамерзаемым. Также

отсутствие одного контура промежуточного теплоносителя повышает коэффициент преобразования теплового насоса. Общий вид установки представлен на рис. 5. Можно выделить четыре основных компонента построенной установки: термостабилизируемый участок, система термостабилизации, автономная энергетическая система и система мониторинга и управления.

Термостабилизируемый участок состоит из торфяной насыпи размерами 6,2×6 м и высотой 0,4 м. Система термостабилизации включает в себя слабонаклонные сезонно-охлаждающие устройства (СОУ — произведены специально НПО «Север») (10 шт.), тепловой насос (ТН — тепловой мощностью 7 кВт, произведен специально «Brosk») и систему теплосброса. В летнее время система работает в активном режиме, т. е. СОУ напрямую подключены к фреоновому (R32) контуру ТН. В зимнее время предполагается отключение ТН: СОУ будут работать в обычном режиме под действием свободной конвекции. Тепловая энергия, извлекаемая из грунта, передается через теплообменник и сбрасывается в ручей, что позволяет управлять температурой и обеспечивать оптимальные условия для функционирования системы.

Энергосистема включает в себя: два массива по шесть вертикально расположенных двусторонних солнечных батарей (СБ — Sila Solar SIM550-24-10BB-PERC-TPB), ориентированных на запад и восток; гибридный солнечный инвертор (Sila MAX 7200MH); систему аккумуляторных LiFePO₄ батарей (SunStonePower SLPO12-100, напряжение 48 В, емкость 100 А·ч); частотный преобразователь (ESQ-760-2S-0055), используемый для управления частотой работы компрессора ТН [16], его потребление на номинальной частоте 50 Гц составляло 1,4 кВт

и при ясной погоде обеспечивалось от восхода до заката солнца.

Управление установкой и системой мониторинга осуществляется посредством программируемого реле (ОВЕН ПР200) и группы модулей (ОВЕН ПРМ, ПРЕ), передающих данные по интерфейсу RS-485. Осуществляется мониторинг температур грунта и торфа на глубинах 0, 10, 20, 40, 80, 160, 320 и 500 см, а также тепловых потоков на различных участках установки.

В результате испытаний системы термостабилизации установлено, что плотность теплового потока от охлаждаемого торфа к СОУ достигала 900 Вт/м^2 (на поверхности испарительной части). СОУ были заправлены избыточным количеством фреона, соответствующим полному заполнению наклонной части, что позволяло выравнять таким образом процесс охлаждения в течение суток. При этом температура холодного контура ТН держалась на уровне $-18,8^\circ\text{C}$. Таких высоких результатов во многом удалось достичь благодаря организации интенсивного теплосброса в ручей: после выхода установки на номинальный режим работы температура подачи в ручей составляла порядка 25°C , а возврата — 13°C .

Выводы

Стоимость предлагаемого автозимника будет составлять около 1 млн долл./км, что в любом случае дешевле традиционных автодорог, сопоставимо с мобильными дорожными плитами и с затратами на строительство и содержание автозимника специального назначения в течение 15—20 лет без учета разницы в сроках эксплуатации. При равенстве площади дороги и солнечных батарей имеет значительный запас холодопроизводительности для термостабилизации грунтов, достигающий максимума в апреле-июне, что обеспечит значительное продление сроков эксплуатации автозимников и принципиально дает возможность сделать их круглогодичными.

Кроме того, тепло (до 130 Вт/м^2 в холодное время года), отводимое холодильными машинами, и особенно излишки энергии, получаемой от солнечных батарей (до 40 Вт/м^2), могут быть направлены на энергоснабжение поселков и пунктов обогрева, генерируя существенный дополнительный доход с учетом того, что стоимость энергии в таких отдаленных районах в 10—30 раз выше, чем в центральных районах страны. Заложенные в расчеты данные по производству электроэнергии солнечными батареями и холодопроизводительности теплового насоса, как и системы в целом, подтверждены экспериментально.

Излишки энергии также могут быть использованы для работы электрических паромов на переправах, что также существенно сократит экологические риски для нерестовых рек. Таким образом, кроме продления сроков эксплуатации зимников приме-

нение предлагаемой технологии позволит создать транспортно-энергетические коридоры, повышающие устойчивость изолированных поселений и улучшающие качество жизни в них.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Архангельской области (грант 22-19-20026, <https://rscf.ru/project/22-19-20026/>).

Благодарность

Использовано вычислительное оборудование УНУ «Пучок-М» и лицензия на программный комплекс Frost 3D, бесплатно предоставленная МГТУ им. Н. Э. Баумана его разработчиком — ООО НТЦ «Симмэйкерс». Авторы признательны А. С. Тутунину и С. В. Чуркину за помощь в создании экспериментальной установки.

Литература/References

1. Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V., Sadurtdinov M., Shein A., Skvortsov A., Sudakova M., Tsarev A. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic. *Energies*, 2022, 15 (7), 2311. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15072311>.
2. Востокгосплан. 2022. URL: <https://vostokgosplan.ru/wp/2022/03/эксперты-фану-востокогсплан-срок-п/>. Vostokgosplan. 2022. Available at: <https://vostokgosplan.ru/wp/2022/03/эксперты-фану-востокогсплан-срок-п/>. (In Russian).
3. Muller S., French H., Nelson F. Frozen in time: Permafrost and engineering problems. *American Society of Civil Engineers*, 2008. DOI: 10.1061/9780784409893.
4. Badina S., Pankratov A. Assessment of the Impacts of Climate Change on the Russian Arctic Economy (including the Energy Industry). *Energies*, 2022, 15 (8), 2849. DOI: 10.3390/en15082849.
5. Pospelov P., Korochkin A., Evtyukov S. Pavement design and construction in the Arctic climate. *Transportation Research Procedia*, 2021, 57, pp. 489—494. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.076.
6. Loktionov E., Sharaborova E., Shepitko T. A sustainable concept for permafrost thermal stabilization. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 52, 102003. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102003.
7. Qin Y., Li Y., Bao T. An experimental study of reflective shading devices for cooling roadbeds in permafrost regions. *Solar Energy*, 2020, 205, 1351. DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.054.
8. Kong X., Dore G., Calmels F. Thermal modeling of heat balance through embankments in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 158, 117. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.11.013.
9. Научно-прикладной справочник по климату СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1989.

- Research and applications reference book on the climate of the USSR. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1989. (In Russian).
10. Veselov V. M., Priblyskaya I. R. Specialized arrays for climate research. Available at: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>.
11. Stolbovoi V., McCallum I. Land Resources of Russia. Available at: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/copyright.htm.
12. Yinfei D., Shengyue W., Shuangjie W., Jianbing C. Cooling permafrost embankment by enhancing oriented heat conduction in asphalt pavement. Applied Thermal Engineering, 2016, 103, 305. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.115.
13. Роман Л. Т., Мерзляков В. П., Малеева А. Н. Влияние степени водогазонасыщения на температурные деформации мерзлых грунтов // Криосфера Земли. — 2017. — 21 (3). — pp. 24—31. — DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(24-31).
- Roman L., Merzlyakov V., Maleeva A. Thermal deformation of frozen soils: Role of water and gas saturation. Earth's Cryosphere, 2017, 21(3), pp. 23—291. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(23-29).
14. Wang T., Zhou G., Chao D., Yin L. Influence of hydration heat on stochastic thermal regime of frozen soil foundation considering spatial variability of thermal parameters. Applied Thermal Engineering, 2018, 142, 1. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.069.
15. Korshunov A., Doroshenko S., Nevzorov A. The Impact of Freezing-thawing Process on Slope Stability of Earth Structure in Cold Climate. Procedia Engineering, 2016, 143, pp. 682—688. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.100.
16. Klokov A. V., Tutunin A. S., Sharaborova E. S., Korshunov A. A., Loktionov E. Y. Inverter Heat Pumps as a Variable Load for Off-Grid Solar-Powered Systems. Energies, 2023, 16 (16), 5987. DOI: 10.3390/en16165987.

Информация об авторах

Локтионов Егор Юрьевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), e-mail: eloktionov@mail.ru.

Шараборова Елизавета Сергеевна, аспирант, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Швейцария, Lausanne, Rte Cantonale), e-mail: elizaveta.sharaborova@epfl.ch.

Клоков Александр Валерьевич, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, Лефортовская наб., д. 1), e-mail: klokov2000@inbox.ru.

Бахмадов Абдула Вахитович, студент, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, Лефортовская наб., д. 1), abdulla5384@mail.ru.

Коршунов Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой, Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова (163002, Россия, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17), e-mail: a.korshunov@narfu.ru.

ON THE POSSIBILITY OF EXTENDING THE SERVICE LIFE OF WINTER ROADS USING RENEWABLE ENERGY SOURCES

Loktionov, E. Yu.¹, Sharaborova, E. S.^{1,2}, Klokov, A. V.¹, Bakhmadov, A. V.¹, Korshunov, A. A.³

¹ Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

² École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Lausanne, Switzerland)

³ Northern (Arctic) Federal University (Arkhangelsk, Russian Federation)

The article was received on February 6, 2023

For citing

Loktionov E. Yu., Sharaborova E. S., Klokov A. V., Bakhmadov A. V., Korshunov A. A. On the possibility of extending the service life of winter roads using renewable energy sources. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 447—455. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-447-455. (In Russian).

Abstract

It is hard to overestimate the role of winter roads in the land logistics of the northern regions. In recent years, climate change has not only significantly reduced the service life of winter roads, but also made them less predictable. This forces transportation to increase in intensity, often at the expense of safety, or to stop that suddenly, leaving vehicles and equipment unused for long periods and disrupting project deadlines. Therefore, extending the service life of winter roads and reducing dependence on local weather conditions is a very urgent task. To solve it, we considered the possibility of applying our previously proposed method of thermal stabilization of frozen ground using solar panels and heat pumps, and estimated the associated costs. Our calculations have shown that it is possible to extend significantly the service life of unpaved winter roads, up to year-round use, in the case of using the most lightweight road pavement without creating a cushion. The approach can contribute to solving a whole range of problems of sustainable development of the Russian Arctic territories by creating transport and energy corridors.

Keywords: *winter road, thermal stabilization, photovoltaic modules, heat pumps, artificial freezing, transport and energy corridor.*

Funding

The Russian Science Foundation and the Arkhangelsk region (grant 22-19-20026, <https://rscf.ru/project/22-19-20026/>) supported the work.

Acknowledgements

The computational equipment “Beam-M” and the license for the Frost 3D software package, provided free of charge by its developer Bauman Moscow State Technical University — STC Simmakers LLC. The authors are grateful to A. S. Tutunin and S. V. Churkin for their help in creating the experimental setup.

Information about the authors

Loktionov, Egor Yur'evich, PhD in Engineering, Lab Head, Bauman Moscow State Technical University (5-1, 2nd Baumanskaya str., Moscow, Russia, 105005), e-mail: eloktionov@mail.ru.

Sharaborova, Elizaveta Sergeevna, Postgraduate Student, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Lausanne, Switzerland), e-mail: elizaveta.sharaborova@epfl.ch.

Klokov, Alexander Valer'evich, Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University (1, Lefortovskaya Nab., Moscow, Russia, 105005), e-mail: kav181174@student.bmstu.ru.

Bakhmadov, Abdula Vakhitovich, Student, Bauman Moscow State Technical University (1, Lefortovskaya Nab., Moscow, Russia, 105005), e-mail: abdulla5384@mail.ru.

Korshunov, Alexey Anatol'evich, PhD in Engineering, Head of Department, Northern (Arctic) Federal University (17, Nab. Severnoy Dvini, Arkhangelsk, Russia, 163002), e-mail: a.korshunov@narfu.ru.