

УДК: 534.836.2

DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0037

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ В КОНСТРУКЦИЯХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2021

Каверзнева Татьяна Тимофеевна, кандидат технических наук, доцент ВШТБ

Дзюба Никита Павлович, бакалавр ВШТБ

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29,

e-mails: kaverztt@mail.ru, dzyuba.np@edu.spbstu.ru)

Аннотация. Для защиты селитебных территорий от шума транспортных потоков в мегаполисах широко используются акустические экраны различной модификации, которые, однако, показывают частичную эффективность по реализации возложенных на них защитных функций. Это можно объяснить различными причинами, например, сложной шумовой картиной, несовершенством шумоизоляции, дороговизной исполнения и другими. В статье проанализированы проблемы, связанные с необходимостью обеспечения эффективности шумозащитных мероприятий в условиях неуклонного роста шумовых нагрузок от транспортных потоков. Показано, что использование транспортных акустических экранов с козырьками, в конструкцию которых включены солнечные батареи, способно обеспечить инвестиционную привлекательность проектов дорожных магистралей за счёт потенциальной прибыли от энергетической составляющей. Для создания концепта сооружения акустической защиты в г. Санкт-Петербурге был выбран участок территории с превышением допустимого уровня шума вблизи крупной автомагистрали и железной дороги, проведены необходимые измерения шума и создана 3D-модель участка магистрали с конструкцией, которая совмещает функции акустического экрана и солнечной электростанции. Проведена оценка эффективности защитного экрана по методическим рекомендациям по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам от Росавтодора для галерей и туннелей. Проанализированы работы, относящиеся к тематике климата Ленинградской области, солнечного сияния, потенциала использования солнечной энергии на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Приведены показатели, характеризующие шумозащитную и энергетическую эффективность предложенного решения. Эксплуатация сооружения способна обеспечить шумозащиту и выработку электроэнергии от солнечных батарей, оценочные расчеты показали, что пользоваться вырабатываемым электричеством в течение полугода сможет около 2000 семей. Можно ожидать, что перспективы использования элементов солнечных батарей в конструкциях транспортных акустических экранов будут значительнее в географических точках нашей страны с большей солнечной активностью.

Ключевые слова: шумозащита, акустические экраны, шумовое загрязнение, транспортные потоки, солнечная энергия.

PROSPECTS FOR THE USE OF SOLAR CELLS IN THE CONSTRUCTION OF ACOUSTIC SCREENS IN THE RUSSIAN FEDERATION

© 2021

Kaverzneva Tatyana Timofeevna, ph.d. in engineering,

associate professor of the Higher School of Technosphere Safety

Dzyuba Nikita Pavlovich, bachelor's degree of the Higher School of Technosphere Safety

St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great

(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, e-mails: kaverztt@mail.ru, dzyuba.np@edu.spbstu.ru)

Abstract. To protect residential areas from the noise of traffic flows in megacities, acoustic screens of various modifications are widely used, which, however, show partial effectiveness in implementing the protective functions assigned to them. This can be explained by various reasons, for example, a complex noise picture, imperfect sound insulation, high cost of execution, and others. The article analyzes the problems associated with the need to ensure the effectiveness of noise protection measures in the conditions of a steady increase in noise loads from traffic flows. It is shown that the use of transport acoustic screens with visors, the design of which includes solar panels, can ensure the investment attractiveness of highway projects due to the potential profit from the energy component. To create a concept for the construction of acoustic protection in the city of In St. Petersburg, a section of territory with an excess of the permissible noise level near a major highway and railway was selected, the necessary noise measurements were carried out, and a 3D model of the highway section was created with a design that combines the functions of an acoustic screen and a solar power plant. The effectiveness of the protective screen was evaluated according to the methodological recommendations for the protection of territories adjacent to highways from Rosavtodor for galleries and tunnels from traffic noise. The article analyzes the works related to the climate of the Leningrad region, solar radiance, and the potential of using solar energy in the territory of St. Petersburg and the Leningrad region. The indicators that characterize the noise protection and energy efficiency of the proposed solution are given. The operation of the facility is capable of providing noise protection and generating electricity from solar panels, estimated calculations have shown that about

2000 families will be able to use the generated electricity for six months. It can be expected that the prospects for the use of solar cells in the construction of transport acoustic screens will be more significant in geographical locations of our country with greater solar activity.

Keywords: noise protection, acoustic screens, noise pollution, traffic flows, solar energy.

Введение. В настоящее время в мире остро встаёт проблема негативного воздействия шумовых нагрузок на население, как в жилых кварталах, так и в местах трудоустройства, которыми также могут являться жилые кварталы. В условиях постоянно растущего транспортного потока через существующие транспортные магистрали и строительства новых транспортных коридоров, главным источником шума в городской среде является автомобильный транспорт и сопутствующая инфраструктура.

В ситуации роста шумовой нагрузки от транспортных потоков перед градостроителями, проектировщиками, а также профильными организациями ставятся задачи защиты селитебных территорий от шума. Для организации шумозащиты применяются такие мероприятия, как возведение акустических экранов, расположение магистрали в выемке, использование полосы зелёных насаждений [1, 2]. Однако, данные мероприятия могут показывать частичную эффективность по реализации возложенных на них функций [3, 4], что можно объяснить несовершенством существующих методов по организации шумоизоляции и дороговизной соответствующих. Так, для Санкт-Петербурга стоимость за один квадратный метр шумозащитного экрана с учётом монтажа составляет 21 тысячу рублей [5].

Возможным решением проблемы недостаточной эффективности и высокой стоимости организации шумозащитных мероприятий может быть использование транспортных акустических экранов, в конструкцию которых включены солнечные батареи, обеспечивающие повышение инвестиционной привлекательности проектов дорожных магистралей за счёт потенциальной прибыли от энергетической составляющей.

Для проведения исследования был произведён поиск научных статей и официальной информации профильных ведомств по потреблению электроэнергии в Санкт-Петербурге, потенциалу солнечной энергетики на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области, солнечным панелям (*noise barrier photovoltaics (NBPV)*, *building integrated photovoltaics (BIPV)*), а также нормативно-правовым актам, регулирующим вопросы защиты от шума.

Исследования *BIPV* прогнозируют рост индустрии солнечной энергетики в общей мировой энергетике и увеличение производимой энергии объектами солнечной энергетики [6, 7]. Потенциал использования солнечной энергии на территории РФ оценён в источнике [8]. Как показано в работе [9], нанесение граффити на солнечные панели может существенно снизить производство ими электроэнергии. Автором статьи рассмотрено решение данной проблемы применением специального «анти-граффити» покрытия. Данное решение имеет свои недостатки, такие как: необходимость в очищении поверхности панели, удорожание

стоимости инфраструктуры, а также устаревание покрытия. В источниках [10, 11] можно найти проекты существующих шумозащитных экранов с использованием солнечных батарей. Однако, только одно из двух упомянутых решений, представленное в проекте *PV-SUD*, смогло бы полностью выполнять свою функцию в городских условиях, поскольку благодаря своей конструкции обеспечивало необходимое снижение шума. Среди русскоязычных источников статья [12], посвящённая теме *NBPV*, является обзорной, и не отвечает на вопросы о целесообразности использования *NBPV* на территории РФ.

Целью исследования является обоснование включения солнечных батарей в конструкцию транспортных акустических экранов, обеспечивающих инвестиционную привлекательность проектов дорожных магистралей.

Материалы и результаты исследования. Оценка шумозащитных свойств экрана и энергетических показателей солнечных батарей зависит от ряда параметров, таких как: ширина магистрали, удалённость магистрали от селитебных территорий, размеры экрана, совокупная площадь солнечных панелей, угол наклона козырька относительно земли [13]. Численные значения этих параметров обуславливают результаты, отражающие эффективность предложенного сооружения.

В ходе исследования проведён анализ литературы, относящейся к расчётам эффективности акустических экранов и использования солнечной энергии. Из методик оценки акустической эффективности выбрана методика, описанная в «СП 276.1325800.2016 Здания и территории. Правила проектирования защиты от шума транспортных потоков», так как, в отличие от методики из «ОДМ 218.2.013-2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам», в выбранной методике учитывается различие длин звуковых волн, исходящих от автомобильной магистрали и от железнодорожных путей. Учёт различия звуковых волн от разных источников является важным, поскольку, как это будет показано в дальнейшем, в рассматриваемом проекте расчёты целесообразно проводить с учётом вклада только железнодорожного транспорта. Затем, после применения метода прямых измерений, было оценено превышение предельного значения уровня звука в двух расчётных точках на прилегающих территориях, подтвердилась необходимость в организации шумозащитных мероприятий. Следующим этапом было использование картографического сервиса для получения расстояний, необходимых для проведения моделирования шумозащитных мероприятий и соответствующих расчётов. Проанализированы существующие решения по использованию солнечных батарей в автомагистральной инфраструктуре,

выявлены недостатки методами абстрагирования и моделирования. У варианта расположения солнечных панелей под углом “от дороги” уменьшается высота акустической тени, что противоречит основной цели проекта. При расположении панелей у поверхности земли возникает опасность вандализма, в результате которого может снизиться уровень производства электроэнергии. Методом косвенных измерений были оценены акустический эффект по снижению шума за счёт возведения объекта, производство электроэнергии и практические показатели, связанные с ним. Расчёты выполнялись для сравнения двух вариантов конструкции с последующим выбором наиболее эффективного.

Для создания концепта сооружения акустической защиты в г. Санкт-Петербурге был выбран участок Суздальского проспекта, расположенный вдоль квартала вблизи домов 89 и 93 корпус 1. Расположение указанных территорий вблизи крупной автомагистрали, а также железной дороги, и отсутствие акустических экранов, как составляющих магистрали, объясняет необходимость организации шумозащитных мероприятий. Между домами и магистралью расположены спортивная и детские площадки; данные участки территории относятся к селитебным зонам, на которых установлен предельно допустимый уровень шума в 45 дБА согласно «СН 2.2.4/2.1.8.562-96».

Первым этапом исследования было проведение измерения уровня шума на детской и спортивной площадках. Для измерений был использован профессиональный цифровой шумомер DT-805 стандарта IEC651 второго класса точности, а также стандарта ANSI S1.4 второго класса точности с погрешностью 1,5 дБА.

Уровень звука на территории детской площадки составил 63,5 дБА, что превышает предельно допустимое значение. На территории спортивной площадки уровень звука оказался равным 65 дБА, что также превышает предельный уровень. Измерения выполнялись при благоприятных погодных условиях, соответствующим эксплуатационным для прибора, при отсутствии осадков, скорости ветра 1 м/с, температуре 10°C, давлении 740 мм.рт.ст.

Важным фактом является близость железнодорожных путей к территориям, где проводились измерения. Во время движения грузовых поездов шум от подвижного состава будет вносить свой вклад в общую картину шума. Данные обстоятельства обуславливают необходимость в шумозащите прилегающих территорий от шума автомобильной магистрали и железной дороги одновременно. Необходимость в организации шумозащитных мероприятий обоснована результатами экспериментальных измерений.

Данные о взаимном расположении автомагистрали, железной дороги и прилегающих территорий получены с помощью картографического сервиса, высота дома соответствует высоте типовых девятиэтажных домов советского периода. Расстояние от лицевой стороны дома до края дороги ближнего к дому составило 74 м, от дома до железнодорожных путей – 130 м, ширина проезжей части – 27 м, высота дома – 30 м.

Конструкция акустического экрана предполагает использование козырька с солнечными батареями. Высота опор акустического экрана выбрана такой, чтобы наклонённый козырёк не препятствовал проезду большегрузного транспорта в первой полосе, а также, чтобы затруднить доступ населения к козырьку, поскольку акустические экраны могут быть объектами вандализма, например, из-за нанесения уличных рисунков-граффити, что недопустимо, поскольку нанесённый на солнечную панель граффити уменьшает её КПД. Исходя из данных требований, для вертикальной опоры была выбрана высота в 5 м.

Для выбора угла наклона козырька, на котором располагаются солнечные панели, были проанализированы работы, относящиеся к тематике климата Ленинградской области, солнечного сияния, потенциала использования солнечной энергии на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Количество часов солнечного сияния в Санкт-Петербурге в период с октября по март может составлять примерно 5-6 часов за месяц, что существенно ограничивает выработку электроэнергии солнечными батареями, а в период с апреля по сентябрь количество часов достаточно для выработки адекватной потребности электроэнергии. Углы наклона панелей относительно земли, при которых солнечные панели показывают максимальную выработку электроэнергии на территории Санкт-Петербурга, составляют 30° и 40° к горизонту [14].

Был выбран угол в 40°, поскольку при данном угле за счёт большей площади зоны солнечных панелей и высоты самого сооружения достигаются более высокие показатели по производству электроэнергии и акустической эффективности.

Схема расположения жилого дома, автомагистрали и ж/д с акустическим экраном на исследуемой территории представлена рисунком (рис.1).

В соответствии со схемой была создана 3D-модель участка магистрали с акустическим экраном и размещёнными на козырьке солнечными батареями (рис. 2).

Короткая (на рисунке слева) опора планируемого сооружения должна быть сплошной (функция шумозащиты). Также опора должна быть достаточно массивной и широкой в поперечном сечении, поскольку несёт на себе наибольшую часть нагрузки от веса всей конструкции, дополнительно возрастающую в зимний период времени, когда на козырьке-крыше образуется снежный покров. Опора выполняет основную роль в защите от шума прилегающих территорий, поэтому её предлагается выполнить из бетона. Для увеличения устойчивости конструкции по середине дороги и у её дальнего от дома края располагаются медианный и латеральный ряды опор – столбов. Такое решение обеспечит естественную вентиляцию под экраном и более быструю эвакуацию из зоны возможной аварии по сравнению с туннелем, поскольку описанная конструкция оставляет свободное направление для эвакуации.

Для достижения максимального производства электроэнергии козырёк-крышу предлагается полностью покрыть солнечными батареями.

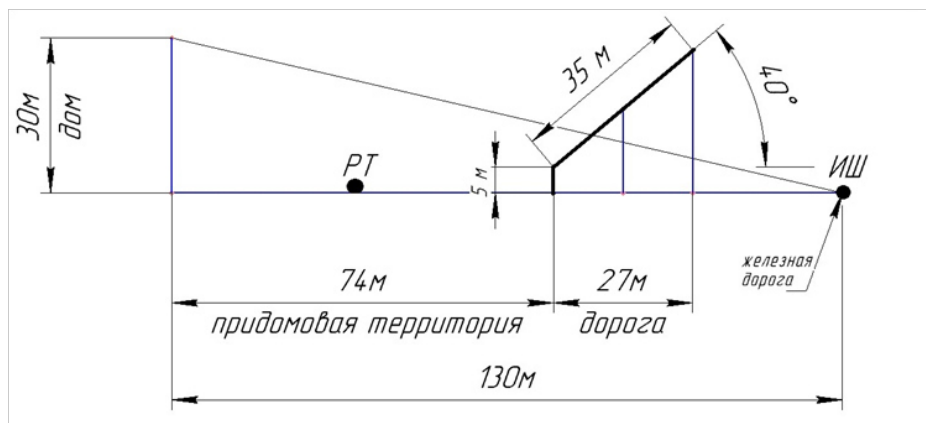


Рисунок 1 – Схема расположения жилого дома, автомагистрали и железнодорожных путей с акустическим экраном

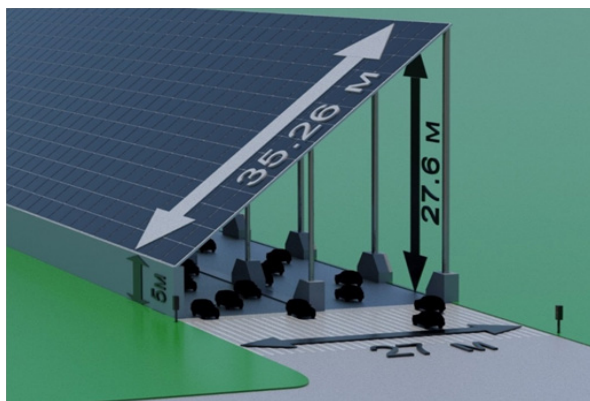


Рисунок 2 – 3D модель акустического экрана с солнечными батареями

Последующие этапы исследования состоят в оценке снижения акустической нагрузки на прилегающие территории, выработки электроэнергии, количества семей, которые смогут пользоваться вырабатываемым электричеством, количество полных циклов перезарядки электромобилей.

Для оценки эффективности защитного экрана можно воспользоваться методическими рекомендациями по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам от Росавтодора для галерей и туннелей. Согласно данному документу при покрытии шумозащитной галереей 75% дороги снижение шума составляет 30 дБА. Так как планируемое сооружение покрывает 100% дороги, будет обеспечен больший эффект по снижению уровня звука. Однако, снижения и в 30 дБА обеспечит защищенность территорий от создаваемого магистралью шума.

Оценка снижения экраном шума от железной дороги может иметь более точную численную оценку. Для звуковой волны имеет место явление дифракции [15]. На этом явлении основана методика расчёта вносимой экраном в изменение уровня звука поправки. Для подсчёта необходимо знать разность длин путей звукового луча до расчётной точки. В качестве расчётной точки выбрано место на детской площадке. Разность длин звукового луча:

$$\delta = a + b - c = 40,07 + 70,13 - 94,5 = 15,7 \text{ м.} \quad (1)$$

где δ - разность длин путей звукового луча, м; a - кратчайшее расстояние между акустическим центром

транспортного потока и верхней кромкой экрана, м; b - кратчайшее расстояние от верхней кромки экрана до расчётной точки, м; c - кратчайшее расстояние от акустического центра транспортного потока до расчётной точки, м.

Снижения шума экраном $\Delta L_{\text{экp}}$:

$$\Delta L_{\text{экp}} = 20 \lg \frac{\sqrt{2\pi \left| \frac{2\delta}{\lambda} \right|}}{\text{th} \sqrt{2\pi \left| \frac{2\delta}{\lambda} \right|}} = 26,7 \text{ дБА} \quad (2)$$

где $\Delta L_{\text{экp}}$ - снижение шума экраном, дБА; δ - разность длин путей звукового луча, м; λ - длина звуковой волны, м;

Проведен расчет показателей, необходимых для оценки энергоэффективности объекта. При длине сооружения вдоль проспекта около 700 метров и ширине козырька 35 метров площадь S козырька-крыши соответствует 24500 квадратных метров. Поскольку выработка электроэнергии с одного квадратного метра в период с апреля по октябрь равна 119,1 кВт·ч/м² при КПД батарей в 15% и угле наклона относительно земли в 40°, количество энергии E , вырабатываемое солнечными батареями планируемого сооружения за выбранный период составит:

$$E = S \cdot E_s = 24500 \cdot 119,1 = 2\,917\,950 \text{ кВт·ч} \quad (3)$$

где E - совокупная энергия, вырабатываемая солнечными панелями, кВт·ч; S - площадь козырька, м²; E_s - выработка электроэнергии с одного квадратного метра, кВт·ч/м².

Для определения количества семей, которые смогут пользоваться энергией, проведен расчёт по тарифу, установленному для газифицированных трёхкомнатных квартир, в которых проживает 4 человека. Для таких семей установлен норматив потребления в 55 кВт·ч на человека в месяц, соответственно на семью потребление составит 220 кВт·ч. Таким образом, пользоваться вырабатываемым электричеством в течение полугода сможет:

$$N = \frac{E}{F \cdot M} = \frac{2\,917\,950}{220 \cdot 6} \approx 2200 \text{ семей} \quad (4)$$

где N - количество семей; E - количество энергии, вырабатываемое солнечными батареями планируемого сооружения за выбранный период; F - потребление электроэнергии одной семьёй, кВт·ч; M - количество месяцев.

Описанные результаты продемонстрировали положительный эффект при эксплуатации планируемого сооружения, обеспечивающего и шумозащиту, и выработку электроэнергии от солнечных батарей.

Заключение. Основой для проведения исследования были недостаточная разработанность тем *BIPV* и *NBPV* в русскоязычной научной литературе и малое количество соответствующих практических решений в совокупности с растущей незащищённостью селитебных зон от шумовых нагрузок. В мире наблюдается общий рост рынка интегрированной с архитектурными сооружениями солнечной энергетики и реализуются масштабные проекты по возведению шумозащитных сооружений с солнечными панелями. В Российской Федерации пока только происходит становление отрасли, связанной с данным видом энергетики. Таким образом, разработки по созданию акустических экранов с использованием элементов солнечных батарей будут способствовать развитию данного направления. Полученные в ходе работы результаты могут быть использованы как стартовые для продолжения исследований в данной области и последующего применения теоретических разработок на практике.

Главным отличием описанного в статье объекта от существующих решений является сравнительно большие (по отношению к опорной части конструкции) размеры козырька. Таким образом, описанный в статье объект имеет оригинальное исполнение, а сочетанный эффект от использования в конструкции солнечных батарей с обеспечением шумозащиты может стать перспективным направлением. Особенно актуальным это решение может быть в тех регионах страны, где за счёт большей солнечной активности подобные объекты смогли бы показывать большую эффективность, связанную с выработкой электроэнергии.

Оценка снижения объектом уровня звука от железнодорожных путей требует дальнейшей проработки, поскольку неизвестно, является ли снижение достаточным для обеспечения защиты территорий от шумовых нагрузок. Это объясняется возможным влиянием эффектов отражения звука, а также интерференции, с шумом от автодороги. Оценка снижения уровня звука от автомобильной магистрали также требует оценки в зависимости от дальности от въездов под экран, поскольку представленный в статье расчёт выполнен для расчётной точки, значительно удалённой от продольных краёв объекта. Однако, описанный результат по снижению шума от автомагистрали позволяет сделать вывод об эффективности планируемого сооружения.

В результатах, связанных с энергетикой, требуют уточнения показатель совокупной выработки электроэнергии объектом за полугодовой период. При расчёте не был учтен эффект затенения солнечных панелей соседними объектами, а также потери при аккумуляции и передаче энергии. Дополнительно требуют изучения возможные варианты формы профиля козырька-крыши, так как это может повысить выработку электричества. В экономическом плане основной интерес для исследований может представлять оценка стоимости

реализации и последующей эксплуатации подобных сооружений, а также сроки окупаемости.

Таким образом, полученные в статье результаты в большей степени отражают эффекты, связанные с целевым применением, и в меньшей степени с экономической составляющей. Для полноценных разработок в данной области требуются всесторонние исследования, рассматривающие аспекты, проблемы и вопросы, связанные с эксплуатацией подобных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кирюшина Н.К., Пузакова А.И., Степанов В.Н. Опыт применения средств и методов шумозащиты при реконструкции и строительстве транспортных магистралей в городе Москве // Защита населения от повышенного шумового воздействия: Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2009. С. 372-381.
2. О. А. Ганжа, Н. А. Куткая, В. В. Прокопенко, О. А. Растяпина Методика выбора шумозащитных мероприятий в градостроительном проектировании // Вестник Волгоградского государственного технического университета. 2018. С. 18-19.
3. Бородкина Ю.С., Каверзнева Т.Т. Шумовая нагрузка многоэтажных зданий и расчет их защищенности от транспортного шума // Материалы научной конференции СПбПУс международным участием. 2018. С. 6-9
4. Иванов Н.И., Буторина М.В., Минина Н.Н. Проблема защиты от шума // Вестник МГСУ. 2011. № 3-1. С. 135-145.
5. Васильев В.А., Ксенофонтова В.К. Шум автомобильного транспорта // Noise Theory and Practice №1 (19). 2020. С. 66-76
6. Radulovic, Jasna & Skerlic, Jasmina & Vaskovic, Mina & Bojic, Ljubisa. Building integrated photovoltaics - potential and application // Quality festival. 2019. P. 527-531.
7. Firsova, Irina & Vasbieva, Dinara & Litvinov, Aleksandr & Chernova, Oxana & Telezhko, Irina. Trends in the Development of the Global Energy Market // International Journal of Energy Economics and Policy. 9. 2019. P. 59-65.
8. Муравлева Е.А. Оценка потенциала использования энергии солнечного излучения на территории России // Вестник аграрной науки Дона. 2015. Вып.1. С. 38-45..
9. Tzikas, Chris & de Jong, Minne & Slooff, Lenneke & Debijs, Michael & Verkuilen, Stijn & Folkerts, Wiep. Graffiti on Solar Noise Barriers, a case study // 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2017. P. 2529-2531.
10. BAM builds a unique noise barrier with integrated solar cells [электронный ресурс]. – Режим доступа –URL: <https://www.bam.com/en/press/press-releases/2017/5/bam-builds-a-unique-noise-barrier-with-integrated-solar-cells> (дата обращения 14.11.2020)
11. PV-SUD Project [электронный ресурс]. – режим доступа –URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/pv-sued.html> (дата обращения 17.11.2020)
12. Шубин И.Л., Тихомиров Л.А. Шумозащитные экраны с интегрированными солнечными батареями // Вестник МГСУ. 2011. №3-1.
13. Курцев Г.М., Безверхая Е.А. Расчет эффективности шумозащитных экранов для малоэтажных жилых застроек, удаленных от автодорог до 200 м // Noise Theory and Practice №1 (15). 2019. С. 64-71
14. Аронова Е.С., Мургул В.А. Оценка целесообразности использования технологий солнечной энергетики в исторической застройке Санкт-Петербурга и климатических условиях Северо-Запада // АМТ. 2013. №2 (23).
15. Пушин К.Е., Бухарина И.Л., Каверзнева Т.Т., Гагарин С.А. Шум: Определение. Методы расчета. Измерения: учебно-методическое пособие. – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет». 2018. – 260 с.

Статья поступила в редакцию 18.04.2021

Статья принята к публикации 16.06.2021