
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Научная статья

УДК 66.011; DOI: 10.61260/2304-0130-2025-4-33-40

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕСТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БЕСПЛОДНЫХ ГРУНТОВ

✉ Кузьмин Анатолий Алексеевич;

Пермяков Алексей Александрович;

Романов Николай Николаевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.

✉ kaa47@mail.ru

Аннотация. Показано, что предметом исследования являются бесплодные грунты, свойства которых следует точно знать перед любым использованием в строительстве. Отмечено, что для определения теплофизических характеристик бесплодного грунта необходимо проводить его лабораторные исследования и натурные испытания для обоснования рекомендаций использования такого грунта. Отмечено, что исследовалось влияние влажности на теплопроводящие свойства «чистых» бесплодных грунтов, а также грунтов, содержащих органические остатки. Констатировано, что коэффициент температуропроводности материала связан со скоростью распространения тепловой волны в теле прогреваемой конструкции. Установлено, что теплопроводящая способность местных материалов, изготовленных на основе бесплодных грунтов, увеличивается с увеличением содержания влаги, в том числе и при наличии в них органических остатков.

Ключевые слова: местные материалы, бесплодный грунт, органические остатки, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности

Для цитирования: Кузьмин А.А., Пермяков А.А., Романов Н.Н. Интерпретация результатов исследования теплофизических свойств местных строительных материалов на основе бесплодных грунтов // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2025. № 4. С. 33–40. DOI: 10.61260/2304-0130-2025-4-33-40.

Введение

Переход на современные экологические технологии производства, снижение ресурсоемкости, энергетических и трудовых затрат при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, в том числе объектов МЧС России, является актуальной проблемой.

Технологическая возможность и экономическая обоснованность применения технологии, ориентированной на комплексную переработку и использование местного сырья, подтверждается многолетней практикой строительства [1, 2].

Для получения высококачественных, прочных и надежных строительных материалов необходимо подбирать и тщательно анализировать исходные компоненты сырьевой смеси с точки зрения рентабельности и ресурсосбережения [3, 4].

Учитывая разнообразие местных материалов в новых регионах, важно исследовать теплофизические характеристики этого типа строительных материалов.

Исследуемые материалы

Предметом исследования являются бесплодные грунты. Поскольку этот материал весьма неоднородный, с отличающимися характеристиками в разных регионах, а также является значительным ресурсом, важно точно знать его свойства перед любым использованием в строительстве, в том числе объектов МЧС России.

Для определения теплофизических характеристик бесплодного грунта необходимо проводить лабораторные исследования и натурные испытания для обоснования рекомендаций использования грунта.

Подготовка образцов. Выбор локации для забора грунта

Учитывая значительные размеры новых российских территорий и разнообразие их метеорологических и геологических данных, исследование было ограничено степной зоной Республики Крым. Исследуемый грунт был взят из отвалов строительства магистрали вблизи г. Керчи с глубины добычи от 1,50 до 2,5 м.

Изготовление образцов

Изготовление образцов грунта было основано на традиционной технологии изготовления сырцовых кирпичей [5]. Из собранного материала отбиралось необходимое количество, которое насыпалось в емкость, и в нее доливался требуемый объем воды. Все перемешивалось до получения консистенции, близкой к пластичной или даже превышающей ее. Затем пасту укладывали в специальную форму до полного заполнения. Сформованную смесь оставляли на 24 ч при комнатной температуре в лаборатории.

После 24-часовой сушки смесь помещают в печь при температуре $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 24 ч. После сушки образцы оставляют охлаждаться на 15–20 мин перед последним взвешиванием. Для получения обожженного кирпича изготавливают образцы, сушат их и оставляют выпекаться в духовке при температуре от $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 12 ч. Для измерения теплофизических характеристик материала методом, известным как «теплоизолированная камера», были изготовлены образцы самана (земля + солома), которые специально помещались в измерительную ячейку. В таблице приведены размеры и подробный состав образцов, изготовленных и высушенных в печи в течение 24 ч.

Таблица

Размеры и состав образцов

№	Название композиции	Бесплодный грунт	Грунт с растительными вкраплениями
1	Масса влажного материала, кг	3,5	0,5
2	Размеры образцов, см	23,28x22,8x2,54	17,52x8,29x1,84
3	Масса сухого материала, кг	2,786	0,409
4	Плотность сухого материала, кг/м ³	2,068	1,529

Методика измерения

Для измерения коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости образцов местных материалов, изготовленных на основе использования бесплодного грунта, применялась экспериментальная установка, конструкция которой предложена в работе [6] и изображена на рис. 1.

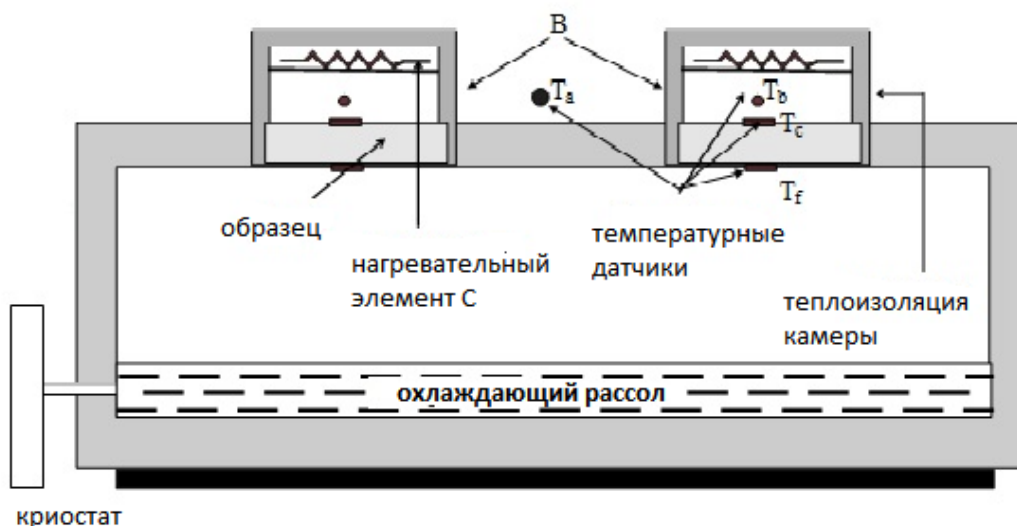


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Измерительная установка включает в себя хорошо теплоизолированный корпус размером 2000x1000x450, внутренняя температура которого остается постоянной (до -10 °С) за счет хорошей теплоизоляции и внешнего криостата с циркуляционной ванной. Две одинаковые измерительные камеры В, изготовленные из десятислойной фанеры, теплоизолированные изнутри достаточным слоем пенополистирола и оснащенные нагревательным элементом С, позволяют проводить одновременно измерения коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости образца. Тепловой поток, выделяемый нагревательным элементом, регулируется внешним реостатом и не превышает 10 Вт.

Датчики температуры и электропитание нагревательных элементов подключены к гибриднему центральному регистратору сбора данных Е7100 с 32 входами и коммуникационным интерфейсом RS232С, что позволило использовать персональный компьютер для непосредственного получения результатов измерений, а также их сохранения или интерпретации [7].

Датчики температуры, представляющие собой датчики на поверхности окружающей среды, расположены между двумя поверхностями образца, которые измеряют температуру обогреваемой поверхности (T_c) и охлаждаемой поверхности (T_f). Датчик, который измеряет температуру окружающей среды, находится внутри камеры (T_b). Другой датчик, общий для обеих камер, измеряет температуру окружающей среды в помещении (T_a).

Измерение коэффициента теплопроводности. Оценка коэффициента теплопроводности

Поскольку величина коэффициента теплопроводности является функцией температуры, выражение коэффициента теплопроводности, усредненное по интервалу [T_c , T_f], задается формулой:

$$\lambda_m = \frac{1}{T_c - T_f} \int_{T_c}^{T_f} \lambda(T) \cdot dT,$$

где λ_m – это коэффициент теплопроводности исследуемого материала, соответствующий средней температуре $T_m = (T_c + T_f) / 2$ для разности температур $\Delta T = T_c - T_f$. При этом предполагается, что между двумя измерениями зависимость $\lambda_m = \text{func}(T_m)$ носит линейный характер.

В установившемся режиме, основываясь на уравнении теплового баланса, эффективное значение коэффициента теплопроводности можно вычислить как:

$$\lambda_{эфф} = \frac{e}{S \cdot (T_c - T_f)} \cdot \left[\frac{U^2}{R} - C \cdot [T_b - T_a] \right],$$

где e – толщина образца; S – площадь теплообмена; C – теплоемкость измерительной камеры; U – напряжение на клеммах нагревательного элемента с сопротивлением R .

Для вычисления теплоемкости была использована формула, предложенная в источнике [4]:

$$C = b \cdot \left(\frac{4 \cdot a}{d} + 2,23 \right) \cdot \lambda + \left(\frac{a}{d'} + 2,57 \right) \cdot \lambda' + 0,6 \cdot \left(\frac{d}{a} \right)^2,$$

где $\lambda = 0,0033$ Вт/(м·°С) – коэффициент теплопроводности пенополистирола; $\lambda' = 0,12$ Вт/(м·°С) – коэффициент теплопроводности березовой фанеры; $d = d_1 + d_2$; $d' = 2 \cdot d_1 + d_2$:

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{1}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}} \cdot \frac{\lambda_n}{d_n} \approx \frac{1}{\frac{2 \cdot d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}}.$$

Значения постоянных a , b , d_1 , d_2 , e , l , l' следуют из геометрических характеристик измерительной камеры (рис. 2):

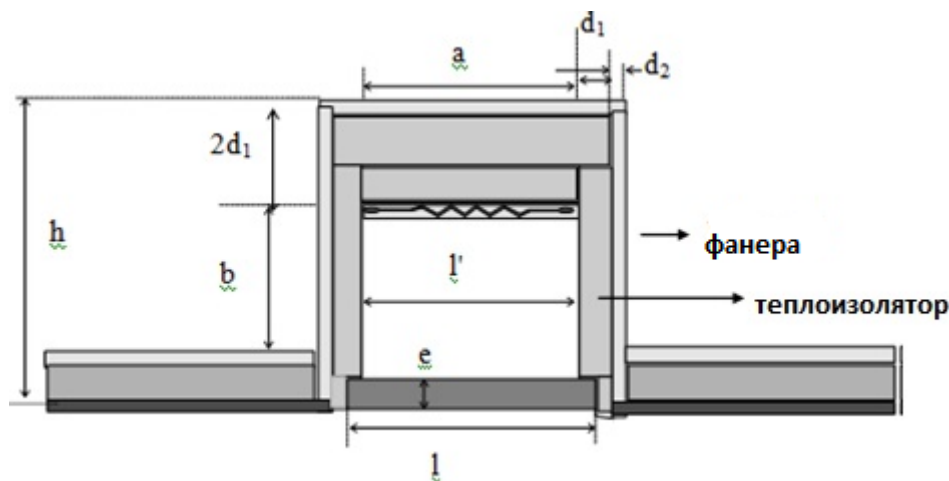


Рис. 2. Геометрические размеры измерительной камеры

Чтобы свести к минимуму боковые потери и с высокой точностью определить теплопроводность, процессы теплообмена внутри теплоизолированной камеры регулируются таким образом, чтобы значение температуры в измерительной камере (T_b) немного превышало температуру окружающей среды (T_a), а разница между ними не превышала 1 °С.

Процедура измерений

1. Измерение разницы температур в измерительной камере (T_b) и окружающей среде (T_a).

Датчик температуры окружающей среды расположен рядом с измерительными камерами и измеряет температуру (T_a) в помещении. Другой прибор, измеряющий температуру, помещается внутри измерительной камеры вблизи ее центра, чтобы температуру можно было усреднить по всему объему. При определении ($T_b - T_a$) и до проверки результатов измерений необходимо убедиться, что внешняя атмосфера была стабильной в течение как минимум двух часов, тогда из-за высокой инерционности измерительной камеры изменение температуры в помещении не будет влиять на величину температуры внутри измерительной камеры.

2. Измерение разницы температур на обогреваемой (T_c) и необогреваемой (T_f) поверхности образца.

Два контактных датчика расположены по обе стороны образца. На необогреваемой поверхности температура остается постоянной (гомогенизирована). Однако на краю обогреваемой поверхности немного холоднее, чем в центре образца. Поскольку разница остается постоянной, необходимо проводить систематическую коррекцию.

3. Измерение напряжения U и сопротивления R нагревательного элемента C .

Поскольку процесс тепловыделения происходит за счет эффекта Джоуля, в начале испытания на тепловыделяющий элемент должно быть подано первоначальное напряжение. После стабилизации температурного режима, особенно температуры в помещении (T_b), можно начать регулирование напряжения. При достижении стационарного режима фиксируется точное значение напряжения, полученное с помощью цифрового вольтметра.

Результаты измерения теплофизических характеристик исследуемых материалов.

Коэффициент теплопроводности

Исследовалось влияние влажности на теплопроводящие свойства «чистых» бесплодных грунтов, а также грунтов, содержащих органические остатки.

Первоначальное содержание воды определяется добавлением определенного количества воды к образцу, предварительно выдержанному в течение 48 ч в закрытом помещении с меньшей изменчивостью температуры и влажности, чтобы обеспечить максимально равномерное распределение воды.

Зависимости коэффициента теплопроводности (λ) «чистого» грунта и грунта, содержащего органические остатки от его влажности (W), представлены на рис. 3, 4 соответственно.

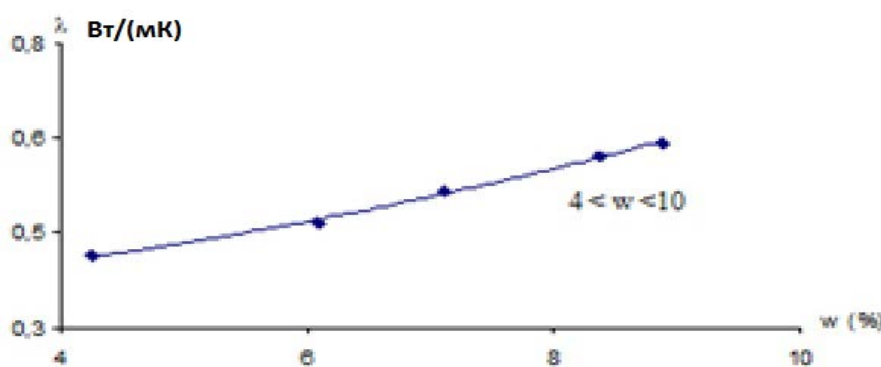


Рис. 3. Зависимость величины коэффициента теплопроводности «чистого» грунта от его влажности

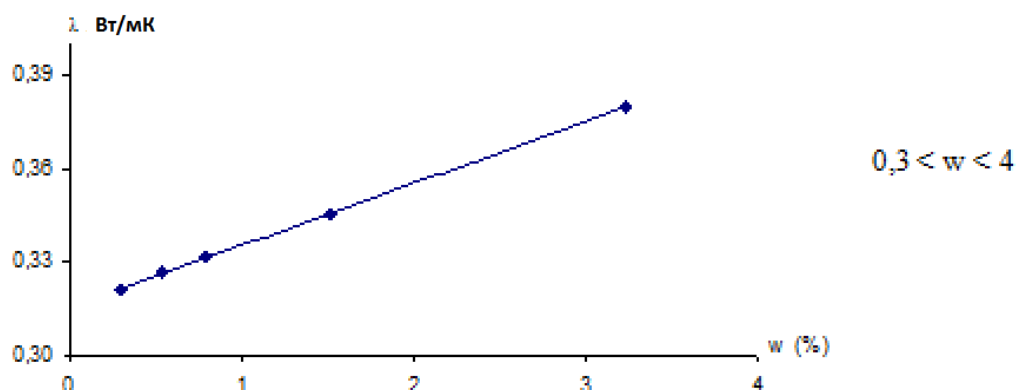


Рис. 4. Зависимость величины коэффициента теплопроводности грунта, содержащего органические остатки, от его влажности

Содержание влаги w было рассчитано по отношению к массе абсолютно сухого образца, полученного путем его запекания в духовке в течение 24 ч при температуре 105 °С.

Интерпретация результатов измерений коэффициента теплопроводности исследуемого материала

Результаты измерений, отображенные на рис. 3, 4, позволяют утверждать, что теплопроводящая способность материалов увеличивается с увеличением содержания влаги независимо от состава образцов. Поскольку образцы представляют собой пористые материалы, в капиллярных пространствах образуются лакуны, заполненные жидкой фазой с более высокой теплопроводностью, чем у сухого воздуха, содержащегося в порах, что приводит к увеличению кажущейся теплопроводности. В работах [8, 9] показано, что для легких материалов теплопроводность увеличивается примерно параболически в зависимости от плотности. Величину коэффициента теплопроводности образцов можно оценить в зависимости от их плотности, описать их полиномом 2-й степени. И поскольку плотность и содержание воды изменяются линейно, точки измерений коэффициента теплопроводности связаны с содержанием влаги полиномом 2-й степени.

Коэффициент температуропроводности

Коэффициент температуропроводности материала связан со скоростью распространения тепловой волны в теле прогреваемой конструкции. Порядок проведения эксперимента был аналогичен случаю измерения коэффициента теплопроводности. Приведенные ниже результаты получены в соответствии моделью, предложенной в источнике [10].

Результаты измерения коэффициента температуропроводности бесплодного грунта и грунта с органическими остатками обобщены на рис. 5, 6 соответственно.

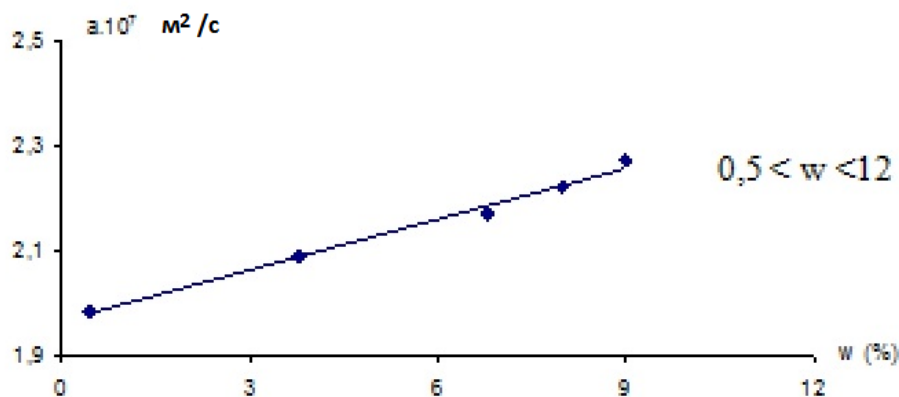


Рис. 5. Зависимость коэффициента температуропроводности от влажности для бесплодного грунта

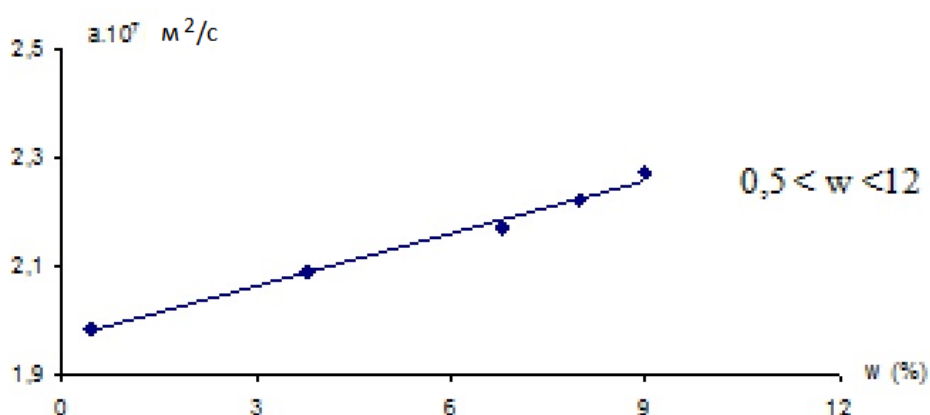


Рис. 6. Зависимость коэффициента температуропроводности от влажности для грунта с органическими остатками

Выводы

Экспериментально установлено, что теплопроводящая способность местных материалов, изготовленных на основе бесплодных грунтов, увеличивается с увеличением содержания влаги, в том числе и при наличии в них органических остатков.

Список источников

1. Структурообразование строительных композиционных материалов на основе местного сырья модифицированных добавками полифункционального назначения / Ю.Г. Иващенко [и др.] // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 6 (39). С. 306–311.
2. Засорин М.С. Исследование влияния физико-механических свойств глинистых грунтов на прочностные свойства грунтобетона // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 5. С. 245–253.
3. , Воронова Н.П., Костюкевич Е.К., Лесун Б.В. Сырьевая смесь для получения пористых строительных материалов из местных сырьевых ресурсов / Н.И. Березовский [и др.] // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. материалов VII Междунар. конф. М.: Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Рос. акад. наук (ИМЕТ РАН), 2017. С. 655–657.
4. Хайыдов Д., Аманнепесов А. Механический состав мелких грунтов и их основные свойства // Символ науки: международный научный журнал. 2023. № 10-2. С. 79–81.

5. Chao-Lung Hwang, Trong-Phuoc Huynh. Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. P. 335–341.
6. S. Buusad, Ezbakne, A. El Bakkour, T. Ajzoul, A. El Bouardi. Etude thermique de la terre stabilise au ciment utilise en construction au Nord du Maroc // *Revue Energies Renouvelables: Journees de Thermique*. 2001. P. 69–72.
7. Методы и средства информационно-операционной поддержки теплотехнических расчетов в решении задач пожарной безопасности: монография / А.А. Кузьмин [и др.]. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России. 2023. 196 с.
8. Kalboussi. Transfert de chaleur en rgime stationnaire et dynamique a travers les milieux poreux humides: Thise de Doctorat.: Energtique. Villeurbanne: Universit Claude Bernard Lyon 1, 1990; 238 p.
9. Кодзоева Х.М. Влияние типа грунта на выбор конструкции фундамента // *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2021. № 8-3 (76). С. 57–59.
10. Philippi I., Batsale J.C., Maillet D., Degiovanni A., Measurement of thermal diffusivity through processing of infrared images // *Rev. Sci. Instrum*. 1995. № 66 (1). P. 182–192.

Информация о статье: статья поступила в редакцию: 12.09.2025; принята к публикации: 19.09.2025

Информация об авторах:

Кузьмин Анатолий Алексеевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: kaa47@mail.ru, SPIN-код: 3604-7853

Пермяков Алексей Александрович, начальник кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: ftoorb@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2081-6934>, SPIN-код: 5444-3350

Романов Николай Николаевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nik57nik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN-код: 4828-4313