

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 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°C до 400°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.

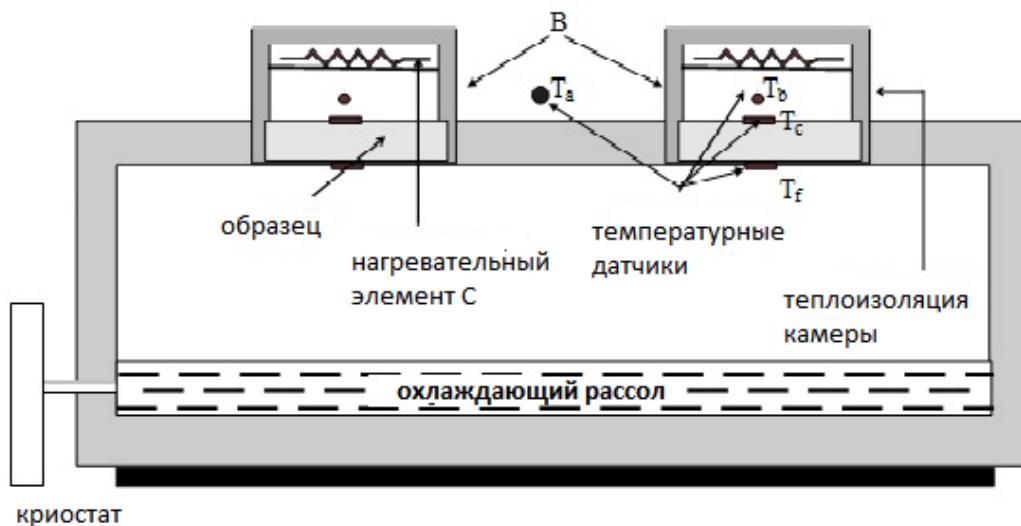


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Измерительная установка включает в себя хорошо теплоизолированный корпус размером 2000x1000x450, внутренняя температура которого остается постоянной (до -10 °C) за счет хорошей теплоизоляции и внешнего криостата с циркуляционной ванной. Две одинаковые измерительные камеры B, изготовленные из десятислойной фанеры, теплоизолированные изнутри достаточным слоем пенополистирола и оснащенные нагревательным элементом C, 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 гибридному центральному регистратору сбора данных E7100 с 32 входами и коммуникационным интерфейсом RS232C, 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:

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

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

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

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

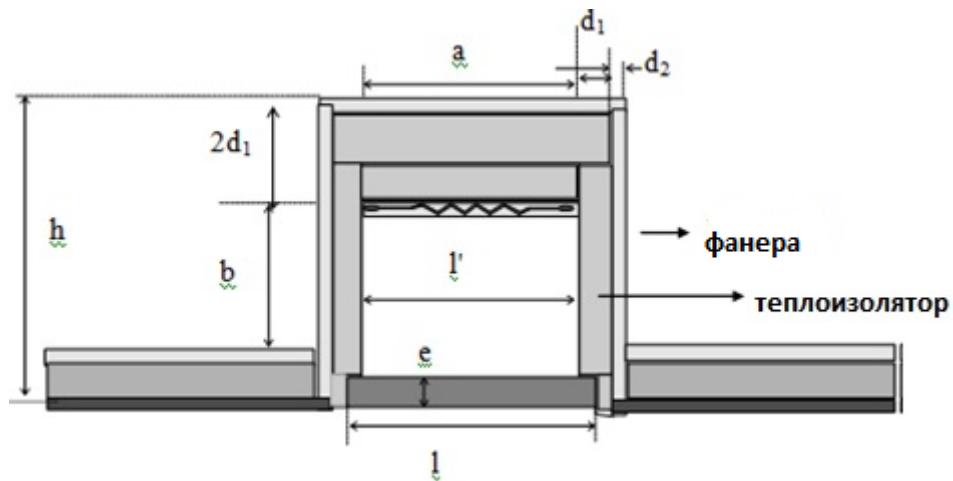


Рис. 2. Геометрические размеры измерительной камеры

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 °C.

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.

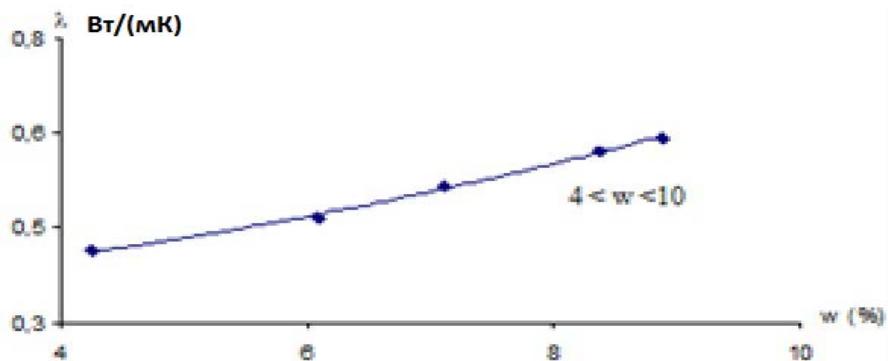


Рис. 3. Зависимость величины коэффициента теплопроводности «чистого» грунта от его влажности

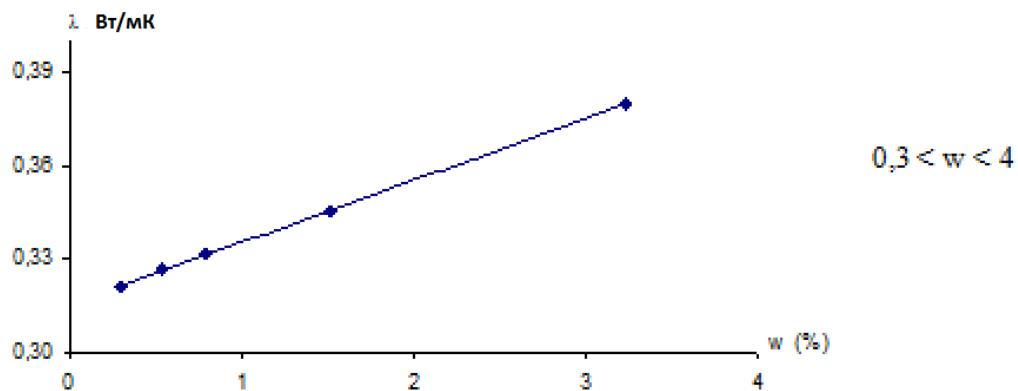


Рис. 4. Зависимость величины коэффициента теплопроводности грунта, содержащего органические остатки, от его влажности

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 °C.

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.

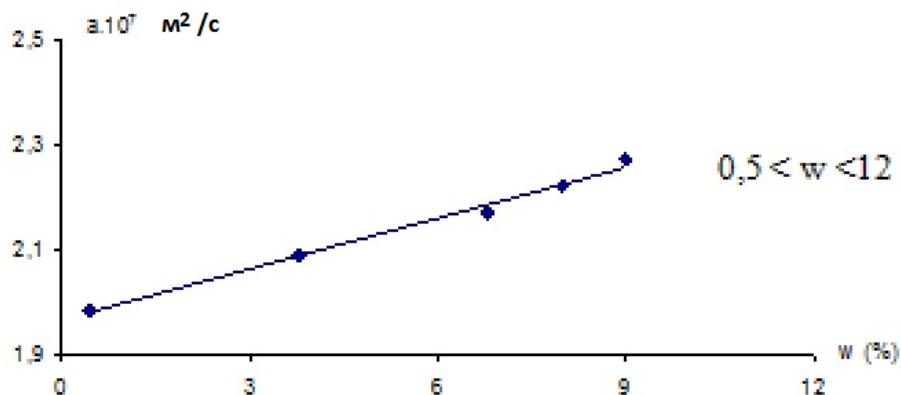


Рис. 5. Зависимость коэффициента температуропроводности от влажности для бесплодного грунта

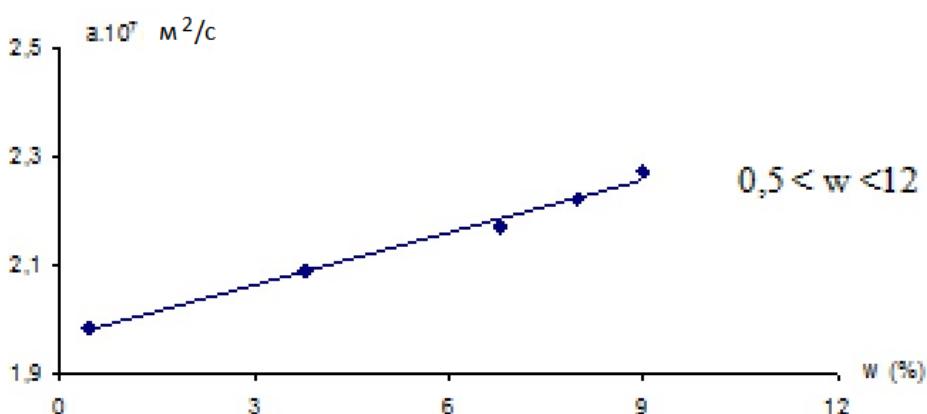


Рис. 6. Зависимость коэффициента температуропроводности от влажности для грунта с органическими остатками

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. Сыревая 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. Хайдыров 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: Journes 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: These 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: ftoopb@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