



УДК 691:523.34

doi: 10.55287/22275398_2026_60_47

КРИТЕРИИ ВЫБОРА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НЕОБИТАЕМОГО ЛУННОГО МОДУЛЯ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА, РАДИАЦИИ И ПЕРЕМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

В. И. Князев
А. П. Мороз

Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, лётчика-космонавта
А. А. Леонова — филиал Московского государственного университета геодезии и картографии,
г. Королёв

Аннотация

Земная номенклатура нормируемых свойств строительных материалов — морозостойкость, водопоглощение, сульфатостойкость — на безатмосферном небесном теле теряет применимость. В статье предложена система из шести критериев выбора материалов ограждающих конструкций обитаемого лунного модуля: вакуумная стабильность по порогам ASTM E595 ($TML \leq 1,0 \%$, $CVCM \leq 0,10 \%$), термоциклическая стойкость при амплитуде от минус 173 до плюс 127°C, радиационно-защитная эффективность на единицу массовой толщины, стойкость к ударно-абразивному воздействию, технологичность в условиях ISRU и ремонтпригодность. Обоснована специфика обитаемого блока, для которого дозовый критерий смягчается с 30 до 10–15 г/см², что позволяет уменьшить реголитовую насыпь до 200–250 мм. Выполнено сопоставление пяти составов ограждающего слоя, предложена аддитивная свёртка частных показателей с весовыми коэффициентами, полученными методом анализа иерархий, и намечена программа экспериментальной проверки на отечественном грунте-аналоге VI-75 (ГЕОХИ РАН).

Ключевые слова

Строительные материалы, ограждающие конструкции, лунный реголит, обитаемый модуль, вакуумная стабильность, термоциклическая стойкость, радиационная защита, ISRU, критерии выбора.

Дата поступления в редакцию
04.09.2026

Дата принятия к печати
09.09.2026

Введение

Номенклатура нормируемых показателей строительных материалов сложилась применительно к земной среде — водной, кислородной, с атмосферным давлением; морозостойкость по ГОСТ 10060-2012, водопоглощение, сульфатостойкость характеризуют материал там, где присутствуют жидкая фаза и газовая оболочка. На безатмосферном теле значительная часть этого аппарата теряет применимость, и на месте привычных шкал — другие: газовыделение в вакууме, стойкость к термоциклам с амплитудой около 300 К, кратность ослабления потоков заряженных частиц. С программными документами

последнего десятилетия (Федеральная космическая программа России на 2016–2025 гг.; «Артемида» с горизонтом создания базы после 2028 г.; российско-китайская Международная научная лунная станция 2031–2035 гг.) задача перешла из концептуальной плоскости в проектную [1; 5]. Транспортное ограничение здесь предельно жёстко: 43,5 т полезной нагрузки на траектории к Луне для «Сатурна-5», 32 т для «Энергии», 27 т для перспективного «Енисея» [2]. Отдельный случай, до сих пор слабо проработанный в отечественной литературе, — обитаемый модуль, то есть приборно-энергетический блок без экипажа, где биологические дозовые лимиты неприменимы, а определяющими становятся радиационный ресурс аппаратуры и температурная стабильность приборного отсека. Цель работы — сформировать и обосновать систему критериев выбора строительных материалов для ограждающих конструкций обитаемого лунного модуля применительно к совместному действию вакуума, ионизирующего излучения и знакопеременных температур.

Основная часть

Первое, что меняется при переходе от обитаемого укрытия к обитаемому, — целевая функция ограждения. Для экипажа предельная доза краткосрочной миссии установлена в 300 мЗв, суточная эквивалентная доза на открытой поверхности Луны при минимуме солнечной активности равна 1,748 мЗв/сут, при максимуме — 10,21 мЗв/сут; вариант защиты «реголит 30 г/см² + полиэтилен 2 г/см² + алюминевый каркас 1 г/см²» снижает дозу за солнечную вспышку с 3 Гр до 15,2 мЗв [3]. Для приборного состава допустимый уровень выше на два-три порядка. Если принять радиационный ресурс бортовой электроники в 30–50 крад по кремнию за пять лет эксплуатации, потребная массовая толщина ограждения снижается до 10–15 г/см² — вдвое-втрое против обитаемого отсека. Выигрыш двойной: меньше масса насыпи – меньше энергозатраты лунохода на её укладку.

Мы исходим из шести групп критериев, которые в нашей логике рассуждения выстраиваются по убыванию отсекающей способности.

1. Вакуумная стабильность материала и связующего. Пороги заимствованы из ASTM E595 — суммарная потеря массы (TML, total mass loss) не выше 1,0 % и масса конденсируемых летучих продуктов (CVCМ, collected volatile condensable material) не выше 0,10 %.
2. Способность выдерживать амплитуду от минус 173 до плюс 127 °С с периодом синодического месяца 29,53 сут без деструкции контактной зоны.
3. Радиационно-защитная эффективность в расчёте на единицу массовой толщины (г/см²); геометрическая толщина слоя сама по себе здесь непоказательна.
4. Стойкость к ударному и абразивному воздействию — микрометеоритный поток, вторичные выбросы реголита, левитирующая пыль.
5. Технологичность в условиях ISRU (in-situ resource utilization — использование ресурсов на месте), где показателем служит массовая доля местного сырья в готовой конструкции.
6. Наконец, ремонтпригодность вместе с возможностью повторного использования оболочки после демонтажа оборудования.

Вакуум отсекает наибольшее число земных прототипов. Гидратационные вяжущие непригодны безоговорочно – портландцементный камень удерживает 15–20% химически связанной и адсорбированной воды, которая при давлении 10^{-10} – 10^{-12} Па уходит из структуры с разрыхлением цементного геля. Как бы ни была привлекательна технологическая простота серных вяжущих (расплав при 119–125 °С, набор прочности за часы вместо 28 сут), первый же фильтр их отсекает: давление насыщенных паров серы уже при плюс 100 °С соизмеримо с фоновым лунным. Полимербетоны на изоцианатных полиуретанах, для которых установлены регрессионные зависимости прочности от мощ-

ности поглощённой дозы [8], сохраняют интерес лишь как тонкие внутренние слои — под насыпью, вне прямого контакта с вакуумом. Остаются два маршрута: спекание реголита без связующего и щелочно-активированные (геополимерные) системы на реголитовом сырье с минимальным привозным активатором. Оба вписываются в линию «космического бетона» и мембранных модулей [9].

Второй фильтр — термоциклирование. Четыре с половиной года эксплуатации дают около 55 полных циклов «лунный день – лунная ночь» продолжительностью по 14,75 сут каждый; малое число циклов при огромной амплитуде и очень низкой скорости нагрева (порядка 0,5 К/ч на терминаторе). Методическая схема ГОСТ 10060-2012 тем не менее применима как прототип: критерием служит отношение остаточной прочности к исходной, и в нашем представлении допустимо задать порог $RF/R_0 \geq 0,85$ после 500 ускоренных циклов минус 170...плюс 120 °С. Ограничение по рассогласованию температурных коэффициентов линейного расширения смежных слоёв мы принимаем на уровне $\Delta\alpha \leq 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ — для пары «титановый каркас ($8,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) — спечённая реголитокерамика ($6,5 - 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)» условие выполняется, для пары с алюминием ($23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) нарушается втрое. Поучительна и судьба земных тяжёлых бетонов по этому критерию; среди недостатков баритовых составов исследователи прямо называют «высокую подверженность усадочным деформациям и слабую устойчивость к циклическим температурным воздействиям» [7, с. 96].

Что определяет радиационную защиту — масса экрана или его элементный состав? В работе И. В. Иванова и В. И. Бурмистрова требование сформулировано определённо: «рекомендуется использовать экраны, состоящие из элементов с малыми значениями ядерного заряда». Механизм авторы поясняют через фрагментацию — при взаимодействии тяжёлых ядер ГКЛ (galactic cosmic rays — галактические космические лучи) с лёгкими элементами первичные ядра распадаются на осколки с малой длиной пробега, отчего поток за экраном ослабляется многократно; к числу пригодных материалов отнесены «полимеры, а также материалы, содержащие бор (B) и нитрид бора (BN)» [3, с. 371]. Числовое подтверждение содержится в коэффициентах ослабления: реголит массовой толщиной 10 г/см² даёт 0,61, 30 г/см² — 0,41, тогда как полиэтилен всего 2 г/см² — 0,29 [3]. Земная параллель показательна — композит на модифицированной дробе гидрида титана с глинозёмистым вяжущим обеспечивает ту же кратность ослабления нейтронного потока при толщине примерно в 1,7 раза меньшей, чем у обычного бетона [6].

Варианты ограждающего слоя мы сопоставили по перечисленным основаниям (табл. 1). Отбор ограничен теми составами, для которых доля местного сырья превышает 50% по массе; привозные компоненты учтены отдельной строкой расчёта. Прочностные характеристики приведены к возрасту 28 сут для геополимеров.

Таблица 1

Сопоставление материалов ограждающего слоя необитаемого модуля

Материал	Плотность, кг/м ³	Доля местного сырья, %	Ограничение
Реголит насыпной	1300–1560	100	угол внутреннего трения 10–50°, разрастание пятна застройки
Реголит спечённый	2100–2400	100	энергоёмкость 2,5–4,0 кВт·ч/кг, микротрещины при быстром нагреве
Геополимер на реголите	1900–2200	85–92	привозной активатор, потеря поровой влаги
Серобетон на реголитовом заполнителе	2200–2400	70–80	сублимация серы, TML выше порога
ПЭВП с нитридом бора	950–1050	0	полная доставка с Земли, ползучесть при +120 °С

Разброс плотностей укладывается в интервал 950–2400 кг/м³, и в этом разбросе — нетривиальная оптимизационная задача: лёгкий полиэтилен превосходит спечённый реголит по удельному ослаблению, однако проигрывает ему полностью по транспортной составляющей. Компромисс мы склонны трактовать как многослойность с функциональным разделением слоёв, где реголит принимает на себя массовую толщину, а тонкая водородсодержащая прослойка гасит вторичное излучение.

В основании ударно-абразивной группы критериев — менее очевидная статистика. Расчётная вероятность падения космического камня на купол радиусом 23,2 м составляет $4,23 \cdot 10^{-6}$ (м²·сут), а суммарное число ударов за пять лет — $7,72 \cdot 10^{-3}$ шт./((м²·ср. экспл.), что превышает порог допустимого риска $1 \cdot 10^{-3}$ событий/год [2]. Вторичный фактор не менее значим: частицы реголита диаметром 1,0–1,5 мм при скоростях до 1 км/с и углах падения 70–80° способны разрушать прозрачные и непрозрачные окна приборов [10]. Абразив здесь двойного происхождения — осколочно-пылевой грунт с медианным размером частиц 40–130 мкм и продукты работы посадочных двигателей. С. А. Сазонова с соавторами фиксируют, что реголит «обладает высокой сжимаемостью в рыхлом состоянии, анизотропией физико-механических свойств, низкой теплопроводностью» [1, с. 63]; последнее свойство отчасти обращается в достоинство, поскольку насыпь толщиной 0,5 м работает одновременно как противометеоритный экран и как теплоизолятор.

Конструктивную реализацию перечисленных требований уже описали в отечественной литературе для стационарной лунной АЭС. «В качестве ограждающей конструкции используется покрытие из кевларовых нитей, хорошо воспринимающих динамические нагрузки, и насыпь местного грунта — реголита, являющегося защитой от космической радиации и тепловых перепадов», — таково решение купола диаметром 23,2 м с отметкой +8,500 м, слоем реголита 500 мм, кевларовой тканью 2 мм и титановыми полуарками трубчатого сечения Ø150 × 5 мм [2, с. 131].

Схема переносима на обитаемый модуль с четырьмя поправками:

1. высотная отметка 3,5–4,0 м вместо +8,500 м;
2. слой реголита 200–250 мм;
3. отказ от транспортного шлюза диаметром 2 м;
4. замена кевларовой навивки базальтотканевым экраном местного производства.

Альтернативный маршрут — монолитная оболочка по технологии наплавления, когда покрытие толщиной 0,1 м на площади 100 × 100 м формируется одним строительным 3D-принтером на солнечной энергии за 250 лунных дней [4]. Темп низкий — привозная масса стремится к нулю.

Свести шесть разнородных критериев к одному числу — задача аддитивной свёртки:

$$K = \sum w_i \cdot q_i, \quad (1)$$

где q_i суть частные показатели в нормированном виде, безразмерные; w_i — весовые коэффициенты, определённые методом анализа иерархий по экспертным парным сравнениям. В нашей предварительной оценке распределение весов таково: вакуумная стабильность 0,26; технологичность ISRU 0,24; термоциклическая стойкость 0,19; радиационная эффективность 0,16; ударная стойкость 0,10; ремонтнопригодность 0,05.

Заключение

При переносе строительно-материаловедческой методологии на условия лунной поверхности нормативная база свойств подлежит замене, а не адаптации: вместо морозостойкости, водопоглощения и сульфатостойкости в основание выбора ложатся газовыделение по ASTM E595, отношение остаточной прочности к исходной после термоциклов амплитудой 300 К, кратность ослабления на единицу массовой толщины и доля местного сырья. Смягчение дозового критерия с 30 до 10–15 г/см², допустимое

для необитаемого модуля, открывает путь к уменьшенной насыпи 200–250 мм и пониженной высотной отметке купола. По совокупности шести критериев предпочтение мы отдаём двухслойной схеме «спечённая реголитокерамика — насыпной реголит» с тонкой водородсодержащей прослойкой, тогда как серобетонные и портландцементные системы отсекаются уже на первом фильтре. Дальнейшая работа предполагает экспериментальную проверку порога $RF/R_0 \geq 0,85$ на отечественном грунте-аналоге VI-75 (ГЕОХИ РАН) с контрольной серией на анортозитовом сырье, в вакуумной камере с давлением не выше $5 \cdot 10^{-5}$ Па.

Библиографический список

1. Сазонова С. А., Белов В. В., Гордеев А. В. Обзор физико-механических свойств реголита и его имитация на земле // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № 3. С. 63.
2. Белов В. В., Сазонова С. А. Некоторые аспекты исследования возможности строительства АЭС на Луне // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23, № 2. С. 124–139. DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-2-124-139.
3. Иванов И. В., Бурмистров В. И. Противорадиационная защита космонавтов в процессе труда на поверхности Луны в краткосрочной миссии // Медицина труда и промышленная экология. 2023. Т. 63, № 6. С. 367–378. DOI: 10.31089/1026-9428-2023-63-6-367-378.
4. Багров А. В., Леонов В. А. Создание космодрома на Луне методом наплавления реголита на монолитную поверхность // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 4 (97). С. 78–83.
5. Леонов В. А. Постоянная лунная станция как приоритет России в освоении ресурсов космоса // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 4 (109). С. 56–67.
6. Ястребинский Р. Н., Карнаухов А. А., Павленко В. И., Городов А. И., Акименко А. В., Фанина Е. А. Радиационно-защитные характеристики композита на основе термостойкой модифицированной дробы гидрида титана // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2022. № 12. С. 86–93.
7. Новиков Н. В., Самченко С. В., Окольников Г. Э. Баритсодержащие радиационно-защитные строительные материалы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21, № 1. С. 94–98.
8. Барабаш Д. Е., Волков В. В., Боровлёв Ю. А. Особенности проектирования рецептур радиационностойких композитов для биологической защиты // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (32). С. 231–238.
9. Орлов Е. А., Бартельс Г. А. Четыре основополагающие архитектурные технологии космической колонизации // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2025. № 4 (67). С. 41–46. DOI: 10.25628/UNIPR.2025.67.4.006.
10. Добрица Д. Б., Леун Е. В. Определение повреждений неудаляемых и удаляемых окон перспективных пенетраторов от ударного воздействия высокоскоростных частиц реголита при ударном внедрении в грунт Луны // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2024. Т. 8, № 1. С. 69–77. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-69-77.
11. Леоненко И. А., Кошкин А. К., Синянский И. А. Исследование, анализ и предложения по увеличению структурной прочности легкого бетона, используемого в несущих и ограждающих конструкциях // Системные технологии. 2025. № 2 (55). С. 72–80.
12. Зиновьева Е. А., Полукаров А. С. Архитектура адаптивных фасадов: конструктивные решения

и новые подходы к изменяющимся климатическим условиям // Системные технологии. 2025. № 2 (55). С. 44 – 48.

13. Обухов Н. Н., Кашинцева В. Л. Тепловые мосты, их влияние на энергоэффективность зданий // Системные технологии. 2025. № 1 (54). С. 90 – 96.
14. Соному Н., Харун М. Влияние базальтовой фибры на прочность высокопрочного бетона // Системные технологии. 2023. № 2 (47). С. 43 – 50.
15. Ляпидевская О. Б. Инновационные подходы к разработке строительных материалов нового поколения // Системные технологии. 2024. № 3 (52). С. 42 – 46.

SELECTION CRITERIA FOR BUILDING MATERIALS USED IN ENVELOPE STRUCTURES OF AN UNCREWED LUNAR MODULE UNDER VACUUM, RADIATION AND VARIABLE TEMPERATURES

V. I. Knyazev
A. P. Moroz

Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A. A. Leonov — branch of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Korolev

Abstract

The terrestrial set of regulated properties of building materials – frost resistance, water absorption, sulphate resistance – becomes inapplicable on an airless celestial body. The paper proposes a system of six selection criteria for the materials of envelope structures of an uncrewed lunar module: vacuum stability within the ASTM E595 thresholds ($TML \leq 1.0 \%$, $CVCM \leq 0.10 \%$), thermal cycling resistance over an amplitude from minus 173 to plus 127°C, radiation shielding efficiency per unit of areal density, resistance to impact and abrasive action, ISRU manufacturability, and maintainability. The specific character of an uncrewed unit is substantiated: its dose criterion is relaxed from 30 to 10–15 g/cm², which allows the regolith cover to be reduced to 200–250 mm. Five compositions of the envelope layer are compared, an additive convolution of partial indicators with weights obtained by the analytic hierarchy process is proposed, and an experimental verification programme on the domestic VI-75 lunar soil analogue (GEOKHI RAS) is outlined.

The Keywords

Building materials, envelope structures, lunar regolith, uncrewed module, vacuum stability, thermal cycling resistance, radiation shielding, ISRU, selection criteria.

Date of receipt in edition

04.09.2026

Date of acceptance for printing

09.09.2026

Ссылка для цитирования:

В. И. Князев, А. П. Мороз. Регрессионное моделирование нелинейных взаимодействий прочностных и фильтрационных факторов при оценке устойчивости грунтовых плотин. — Системные технологии. — 2026. — № 3 (60). — С. 47 – 52.