УДК 620.174 : 658.562

МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ДАННЫХ ПРИ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ФУНДАМЕНТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ГРУНТАХ

© 2026 И.Д. Карпов[1], Ю.С. Клочков[2], Б.С. Ермаков[1], С.Б. Ермаков[2], А.А. Альхименко[1]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, научно-технологический комплекс «Новые технологии и материалы», г. Санкт-Петербург, Россия
[2] Тюменский индустриальный университет, Центр технологических инициатив, г. Тюмень, Россия

Статья поступила в редакцию 26.09.2026

Рассмотрена задача обеспечения достоверности данных, входного контроля полимерных композиционных материалов (ПКМ), применяемых в фундаментных конструкциях на многолетнемёрзлых грунтах (ММГ). Показано, что при отсутствии расчётных сопротивлений ПКМ в действующей нормативной базе входной контроль становится единственным источником данных, используемых при верификации модели качества конструкций, работающих в условиях ММГ. Показано, что качество изготовления образцов и соблюдение условий испытания превращаются в самостоятельный фактор, определяющий пригодность полученных значений. Объектом исследования является процесс входного контроля и подбора характеристик ПКМ-профиля под заданные условия эксплуатации. Предложена многоступенчатая система контроля достоверности данных, включающая семь последовательных ступеней: извлечение параметров из протокола испытания, проверку условий испытания, проверку первичных данных, расчёт характеристик, статистическую проверку, назначение нормативного значения и температурного коэффициента условий работы, передачу результата в конечно-элементную модель фундаментной конструкции. На каждой ступени применяются формализованные критерии приёмки, а решение об отклонении сопровождается указанием основания и пополняет классификацию несоответствий. Система апробирована на выборке из двенадцати протоколов трёхточечного изгиба образцов, изготовленных из двух пултрузионных стеклопластиковых профилей по трём схемам раскроя и испытанных при температурах +25 и −60 °C; в каждой схеме раскроя образцы вырезаны как вдоль, так и поперёк волокон. Прогон показал, что шесть протоколов из двенадцати не удовлетворяют критериям достоверности: отношение расстояния между опорами к толщине образца лежит в диапазоне от 6,8 до 13,4 при нормируемом значении 16:1 и предельно допустимом 14:1, у двух образцов нарушено ограничение по ширине, в трёх сопоставляемых парах база сравнения не выдержана, а в одном протоколе автоматически зафиксированный экстремум нагрузки занижен относительно фактического максимума диаграммы нагружения на 58 %. Расхождение результатов в отклонённых парах составляет от −48,5 до +184,0 %, тогда как по принятой выборке из шести протоколов, вырезанных вдоль волокон, получено согласованное значение температурного коэффициента условий работы $k(t) = 1{,}21 \pm 0{,}03$ при коэффициенте вариации внутри температурной группы 4,2-5,3 %. По результатам прогона построена классификация несоответствий процесса входного контроля из семи видов, в которой вероятность возникновения назначена по фактической частоте появления в выборке, а вероятность необнаружения - по результату прогона. Суммарное приоритетное число риска снижается с 2736 до 851, то есть в 3,2 раза. Результаты применимы при разработке методик входного контроля ПКМ и методик мониторинга остаточного ресурса ПКМ-свай по образцам-свидетелям.

Ключевые слова: управление качеством, входной контроль, полимерные композиционные материалы, пултрузия, многолетнемёрзлые грунты, достоверность данных, FMEA, классификация несоответствий, трёхточечный изгиб, отрицательные температуры.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-187-200
EDN: SPQGRB

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов» (FSEG-2024-0009).

Карпов Иван Дмитриевич, инженер. E-mail: karpov_id@spbstu.ru
Клочков Юрий Сергеевич, доктор технических наук, и.о. ректора. E-mail: General@tuiu.ru
Ермаков Борис Сергеевич, доктор технических наук. E-mail: ermanov55@bk.ru
Ермаков Сергей Борисович, кандидат технических наук. E-mail: ermanovsb@tyuiu.ru
Алхименко Алексей Александрович, кандидат технических наук. E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Освоение территорий распространения многолетнемёрзлых грунтов (ММГ) остаётся одним из приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации. Мерзлотой занята значительная часть страны: по разным оценкам от двух третей до 65-70 % территории, причём граница криолитозоны подвижна и её положение меняется вместе с климатом, поэтому точная доля носит оценочный характер. Действующая нормативная база, включая СП 25.13330.2020 [1], регламентирует проектирование фундаментов из традиционных материалов и не содержит расчётных сопротивлений полимерных композиционных материалов (ПКМ) для условий криолитозоны.

При этом ПКМ рассматриваются как перспективная альтернатива стали и железобетону в фундаментных конструкциях на ММГ. Низкая теплопроводность снижает теплоприток в грунтовый массив, коррозионная инертность исключает основной механизм деградации стальных свай, работоспособность которых в арктическом климате определяется в том числе структурной неоднородностью металла [2], а удельная прочность позволяет уменьшить массу конструкции. Несущая способность и расчётные модели пултрузионных стеклопластиковых профилей исследованы в работах [3, 4], отечественная практика их применения в строительных конструкциях отражена в [5, 6]. Опыт применения ПКМ при строительстве и обустройстве месторождений на многолетнемёрзлых грунтах, а также влияние защитных покрытий на работоспособность таких конструкций при экстремально низких температурах рассмотрены в [7, 8].

Материаловедение Арктики уже оформилось в самостоятельное научное направление [9, 10], в рамках которого изучены как климатическое старение композитов в холодном климате [11, 12], так и их механическое поведение при низких климатических температурах [13-16]. Установлено, что при охлаждении прочность стеклопластиков возрастает за счёт стеклования связующего и роста межслойной сдвиговой прочности при одновременном снижении деформативности.

Поскольку расчётные сопротивления ПКМ нормативно не установлены, обязанность получить исходные данные, необходимые для оценки качества (надежности и долговечности) переходит к потребителю, а входной контроль материала становится единственным источником числовых значений, на которых строится проектное решение. Здесь возникает ограничение, определяющее постановку настоящей работы: изготовление образцов стандартной геометрии из готового профиля возможно не всегда. Сечение образца задаётся сечением профиля, длина - размером доступной заготовки, а при мониторинге остаточного ресурса ПКМ-конструкций, в том числе - свай - геометрия образцов-свидетелей определяется буровым инструментом. Качество изготовления образцов, то есть выдержанность их размеров и достижимое отношение расстояния между опорами к толщине, становится самостоятельным фактором достоверности результата. Роль цифрового проектирования в стандартизации конструкций из полимерных композитов для Крайнего Севера рассмотрена в [17], а зависимость механических характеристик полимерного материала от технологии его изготовления и последующей обработки показана, в частности, в [18].

Влияние достижимой геометрии образца на измеряемую прочность при изгибе изучено достаточно полно. При уменьшении отношения расстояния между опорами к толщине образца доля касательных напряжений растёт, и разрушение переходит от изгибного к межслойному сдвигу, что систематически занижает вычисляемое значение прочности [19-21]. К этому добавляется масштабный эффект: прочность единичного образца снижается с ростом его размеров [22, 23]. Вопросы неопределённости измерений при механических испытаниях и калибровки силоизмерительных систем рассмотрены в работах [24-27]. Однако применительно к процедуре приёмки данных входного контроля перечисленные факторы, как правило, не формализованы: решение о пригодности протокола принимается экспертно.

Качество ПКМ-конструкции рассматривается в работе процессно: не как совокупность свойств материала, установленная однократно, а как результат последовательности процессов, каждый из которых вносит вклад в две составляющие качества - надёжность и долговечность. Надёжность понимается как способность конструкции сохранять работоспособное состояние в заданных условиях эксплуатации, долговечность - как сохранение этой способности до наступления предельного состояния. При процессном подходе входной контроль перестаёт быть вспомогательной операцией и становится самостоятельным процессом, результативность которого измеряется достоверностью данных, передаваемых в расчётную модель: недостоверное значение прочности искажает оценку и надёжности, и долговечности независимо от качества самой модели.

Жизненный цикл ПКМ-сваи включает проектирование, изготовление, транспортировку, хранение, строительно-монтажные работы, эксплуатацию, вывод из эксплуатации и утилизацию, и на каждой стадии требуются достоверные сведения о соответствующем процессе. Процессным методом нами выделены подпроцессы, влияющие на надёжность и долговечность конструкции, и

каждый из них разбит на отдельные характеристики. Оценка методом анализа иерархий [28, 29] показала, что наиболее значимым является подпроцесс проектирования, а в нём - обеспечение достоверности исходных данных о свойствах материала, передаваемых в расчётную модель; этот вызов и рассматривается в настоящей работе.

Научная задача работы состоит в разработке метода обеспечения достоверности процесса входного контроля полимерных композиционных материалов для фундаментных конструкций на многолетнемёрзлых грунтах на основе классификации несоответствий процесса контроля и их выявления по формализованным критериям.

Объект исследования – анализ роли подпроцесса входного контроля и подбора характеристик ПКМ-профиля в обеспечении качества (надежности и долговечности) ПКМ-конструкций в заданных условиях эксплуатации. Предмет исследования - методы обеспечения достоверности данных этого процесса.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы изготавливались и испытывались по схеме трёхточечного изгиба по ГОСТ Р 56810-2015 [30]. Материал - два пултрузионных стеклопластиковых профиля одной поставки: двутавр 300×150×15 мм и труба квадратная 100×100×12 мм. Раскрой выполнен по трём схемам, различающимся зоной профиля: схема А - верхняя полка двутавра, схема Б - стенка двутавра, схема Г - стенка трубы. Для каждой схемы разработан раскрой на восемь позиций; испытаниям подвергнуты позиции 1, 2, 3, 6 и 8 каждой схемы, всего двенадцать образцов. Позиции 1 и 2 испытаны при нормальной температуре (+20…25 °С), позиции 3, 6 и 8 - при температуре −60 °С. Программа испытаний построена как полный факторный набор: три зоны профиля (полка и стенка двутавра, стенка трубы) × два направления вырезки относительно оси пултрузии (вдоль и поперёк волокон) × две температуры, что и даёт двенадцать образцов и шесть сопоставляемых пар. Позиции 2 и 3 вырезаны вдоль волокон, позиции 1, 6 и 8 - поперёк волокон. Исходные профили и изготовленные из них образцы приведены на рис. 1; маркировка нанесена на боковую грань каждого образца и содержит номер позиции в схеме раскроя и обозначение профиля.

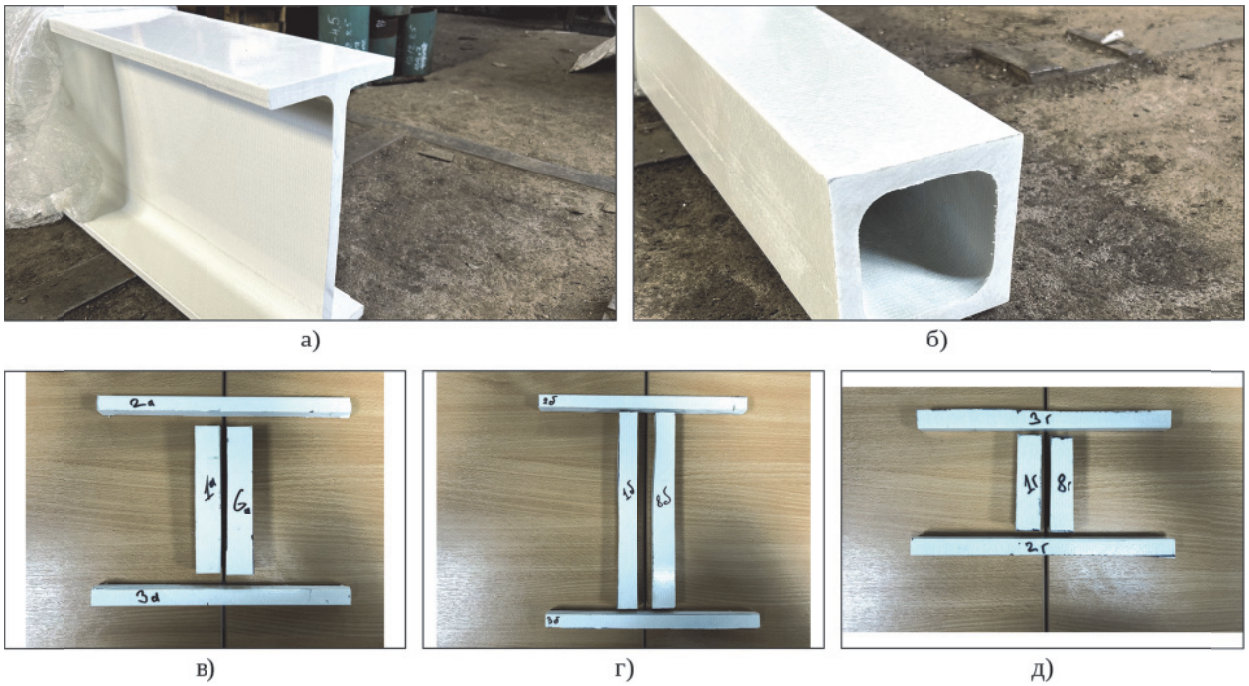

Рис. 1. Объект входного контроля:
а - пултрузионный двутавр 300×150×15 мм; б - пултрузионная труба квадратная 100×100×12 мм;
в, г, д - образцы, изготовленные из них по схемам А, Б и Г соответственно. В каждой группе длинные образцы (позиции 2 и 3) вырезаны вдоль волокон и испытаны на пролёте 200 мм, короткие (позиции 1, 6, 8) вырезаны поперёк волокон, и их длина ограничена поперечным размером профиля

Рис. 1 наглядно показывает основное ограничение процесса. Образцы, вырезанные вдоль волокон (позиции 2 и 3), не ограничены по длине и во всех трёх схемах испытаны на одном пролёте 200 мм. Образцы, вырезанные поперёк волокон (позиции 1, 6 и 8), ограничены поперечным размером самого профиля: полкой двутавра шириной 150 мм, стенкой двутавра высотой 300 мм и

стенкой трубы шириной 100 мм, поэтому достижимый пролёт для них составляет от 70 до 190 мм и изменяется от заготовки к заготовке. Это различие не является следствием нарушения методики испытания - оно задано размерами изделия и доступной заготовки, то есть качеством изготовления образцов, и именно оно определяет дальнейший отбор протоколов.

Размеры поперечного сечения каждого образца определялись как среднее по трём измерениям в зоне нагружения. Диаметр нагружающего и опорных роликов 10 мм, что соответствует радиусам закругления $R_1 = R_2 = (5{,}0 \pm 0{,}2)$ мм, установленным таблицей 1 стандарта [30] для образцов толщиной более 3 мм. Расстояние между опорами назначалось по длине изготовленной заготовки и составляло от 70 до 200 мм. Испытания выполнены на универсальной испытательной машине Instron 5965 с программным обеспечением Bluehill 3 (рис. 2, а). Испытания при отрицательной температуре проводились в климатической камере; температура образца контролировалась термоэлектрическим преобразователем, установленным в зоне нагружения, с выводом показаний на измеритель ОВЕН ТРМ200 класса точности 0,25/0,5 (рис. 2, в). Кондиционирование образцов перед испытанием выполнялось в той же камере (рис. 2, б).

Критерии ступени 2 по геометрии образца взяты непосредственно из [30]. Смысл этих требований один: разрушение должно происходить на внешней поверхности образца от изгибающего момента, а не от касательных напряжений, иначе соотношение (1) неприменимо. Для образцов толщиной более 3,2 мм стандарт нормирует отношение расстояния между опорами к толщине $L/h = 16 \pm 1$ и ограничивает ширину условиями $b < 4h$ и $b \leqslant L/4$; при недостаточной чувствительности измерительного канала допускается снижение L/h, но не ниже 14:1, а для высокопрочных армированных композитов, к которым относится исследуемый материал, рекомендуется 32:1…40:1.

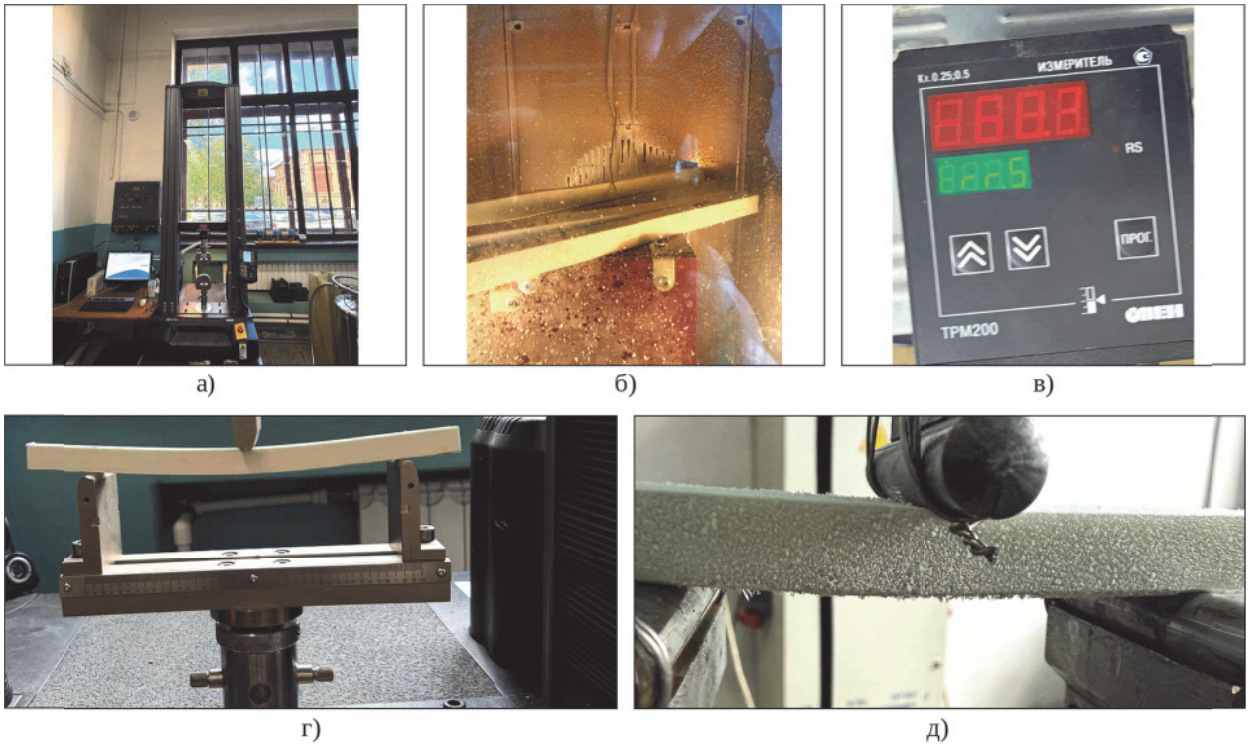

Рис. 2. Условия проведения испытаний:
а - испытательная машина Instron 5965 в лаборатории; б - образец в климатической камере; в - измеритель температуры ОВЕН ТРМ200, показание в момент испытания; г - образец в приспособлении трёхточечного изгиба при +25 °С, поверхность чистая, на планке приспособления видна шкала установки пролёта; д - образец при −60 °С, поверхность полностью покрыта инеем, в зоне нагружения закреплён спай термоэлектрического преобразователя

Сопоставление рис. 2, г и рис. 2, д показывает различие условий в двух температурных группах. При нормальной температуре поверхность образца остаётся чистой, а пролёт выставляется по шкале на планке приспособления. При −60 °С образец полностью покрыт инеем, и в зоне нагружения закреплён спай термоэлектрического преобразователя, то есть температура измеряется на самом образце, а не в объёме камеры.

Сопоставление этих требований с размерами изделия (рис. 1, а, б) показывает, что геометрия профиля не позволила удовлетворить требованиям стандарта [30] ни в одной из подгрупп. В поперечном направлении требование невыполнимо в принципе: при толщине полки двутавра 15 мм

нормируемый пролёт составляет от 225 до 255 мм, тогда как ширина полки равна 150 мм; при толщине стенки трубы 12 мм нормируемый пролёт составляет от 180 до 204 мм при поперечном размере профиля 100 мм. Образец, вырезанный поперёк волокон, оказывается короче требуемого пролёта, и увеличить его нельзя, не меняя самого изделия. В продольном направлении длина заготовки не ограничена, однако принятый пролёт 200 мм при толщине образца около 15 мм даёт отношение L/h = 13,3, что также ниже нормируемого. Отсюда постановка задачи настоящей работы: не отбраковать выборку целиком по формальному признаку, а определить, какие выводы из неё остаются достоверными и при каких дополнительных условиях.

Прочность при изгибе вычислялась по соотношению для балки, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролёта:

$$\sigma = 3FL / (2bh^2), \quad (1)$$

где F - максимальная нагрузка, Н; L - расстояние между опорами, мм; b - ширина образца, мм; h - толщина образца, мм. Деформация крайнего волокна и модуль упругости при изгибе определяются как

$$\varepsilon = 6fh / L^2 ; \quad (2)$$

$$E = L^3m / (4bh^3), \quad (3)$$

где f – прогиб в середине пролёта, мм; m – наклон линейного участка диаграммы «нагрузка - прогиб», Н/мм. Соотношения (1)-(3) справедливы, если разрушение происходит по механизму изгиба, а вклад касательных напряжений пренебрежимо мал, что выполняется только при достаточном отношении L/h.

Температурный коэффициент условий работы определяется как отношение прочности при отрицательной температуре к прочности при нормальной температуре для одного и того же профиля:

$$k(t) = \sigma_{-60} / \sigma_{+25}. \quad (4)$$

Оценка риска несоответствий выполнялась методом анализа видов и последствий отказов по ГОСТ Р 27.303-2021 [31] и ГОСТ Р 51814.2-2001 [32]. Приоритетное число риска вычислялось как произведение

$$ПЧР = S \cdot O \cdot D, \quad (5)$$

где S – значимость последствия, O – вероятность возникновения, D – вероятность необнаружения; каждый показатель оценивается по десятибалльной шкале.

Структурная схема предложенной системы приведена на рис. 3. Система построена как последовательность семи ступеней; каждая принимает результат предыдущей, применяет собственный набор критериев и выносит решение «принят» либо «отклонён с указанием основания». Ступени 1-3 образуют контур проверки достоверности, ступени 4-6 – контур обработки, ступень 7 – контур применения. Отклонённый протокол не удаляется: основание отклонения фиксируется и пополняет классификацию несоответствий. Проверки на ступенях 1-3 независимы, поэтому один протокол может быть отклонён несколькими ступенями по разным основаниям. Последовательность ступеней реализует полный цикл PDCA: нормирование условий испытания соответствует стадии Plan, извлечение и расчёт – стадии Do, проверки и статистический контроль – стадии Check, назначение нормативного значения и передача в модель – стадии Act.

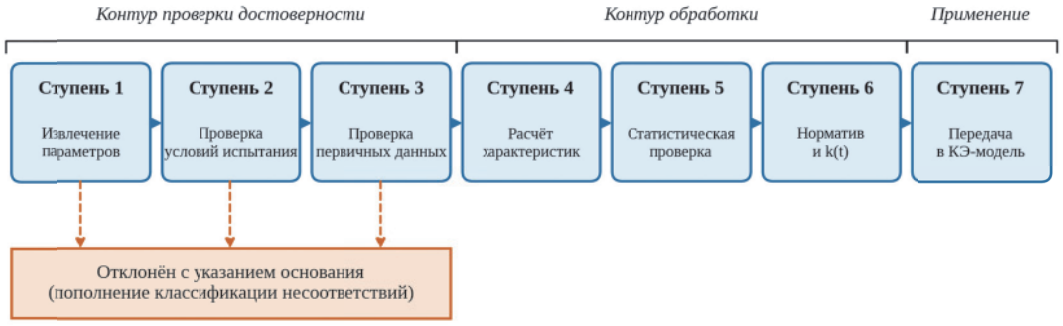

Рис. 3. Структурная схема многоступенчатой системы контроля достоверности данных входного контроля ПКМ

Критерии приёмки по ступеням контура проверки достоверности приняты следующие. Ступень 1 – полнота обязательного набора параметров протокола по перечню раздела 9 стандарта [30]: маркировка и геометрические размеры образцов, длина пролёта между опорами, способ кондиционирования, температура и влажность испытательной среды, тип и класс точности датчика силы, скорость испытания, значения определяемых показателей для каждого образца, любые отклонения от условий стандарта, дата испытания и ссылка на стандарт; пункт 9.2 дополнительно рекомендует включать в протокол диаграммы деформирования и фотографии разрушенных образцов. Ступень 2 - соответствие отношения L/h и ширины образца требованиям таблицы 2 и приложения ДГ стан-

дарта [30], единство схемы опирания, соответствие заданной и фактической температуры, а также постоянство всех условий испытания внутри сопоставляемой пары образцов. Ступень 3 – соответствие зафиксированного в протоколе экстремума нагрузки одному из трёх способов определения критической нагрузки по пункту 3.3 стандарта [30] и совпадение его с фактическим максимумом диаграммы в пределах погрешности измерительного канала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходные данные двенадцати протоколов и вычисленные по соотношению (1) значения прочности при изгибе приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные и расчётные значения прочности при изгибе

Образец	Схема	t, °C	Волокна	L, мм	h, мм	b, мм	L/h	b/L	F, Н	σ, МПа
2а	А	+25	вдоль	200	15,05	13,69	13,3	0,068	6005,8	581,1
2б	Б	+25	вдоль	200	15,05	13,72	13,3	0,069	6036,4	582,7
2г	Г	+25	вдоль	200	14,89	14,86	13,4	0,074	6861,5	624,8
3а	А	−60	вдоль	200	15,14	13,75	13,2	0,069	7537,2	717,4
3б	Б	−60	вдоль	200	15,05	13,70	13,3	0,069	7061,8	682,7
3г	Г	−60	вдоль	200	14,91	14,96	13,4	0,075	8419,5	759,5
1а	А	+25	поперёк	120	13,07	24,32	9,2	0,203	368,5	16,0
1б	Б	+25	поперёк	190	15,14	21,92	12,5	0,115	2071,7	117,5
1г	Г	+25	поперёк	80	10,36	23,55	7,7	0,294	1212,8	57,6
6а	А	−60	поперёк	100	13,02	24,30	7,7	0,243	225,7	8,2
8б	Б	−60	поперёк	200	15,13	21,91	13,2	0,110	1883,4	112,7
8г	Г	−60	поперёк	70	10,32	23,52	6,8	0,336	3901,0	163,5

Ступень 1 зафиксировала два несоответствия полноты первичной документации, общие для всей выборки: протоколы содержат диаграмму нагружения только в виде изображения, без числовых данных, и не содержат скорости испытания, обязательной по пункту 9.1 стандарта [30]. Ни одно из них не является основанием для отклонения отдельного протокола, однако оба внесены в классификацию несоответствий и ограничивают состав вычисляемых характеристик. Для настоящей работы диаграммы оцифрованы по изображению: масштаб осей восстановлен по шагу координатной сетки и цене деления, ноль по нагрузке - по положению маркера экстремума, значение которого приведено в протоколе. Контроль точности выполнен по трём протоколам, в которых указано и значение нагрузки, и значение перемещения: расхождение восстановленного перемещения с протокольным не превышает 0,01 мм, восстановленной нагрузки - 1 %. Этого достаточно для сопоставления формы кривых и для проверки экстремума на ступени 3, но недостаточно для назначения модуля упругости как расчётной характеристики, поэтому модуль упругости при изгибе в работе не определялся.

Ступень 2 показала, что отношение L/h по всей выборке лежит в диапазоне от 6,8 до 13,4 при нормируемом значении 16:1, предельно допустимом 14:1 и рекомендуемом для высокопрочных армированных композитов 32:1…40:1. Ни один протокол не достигает даже предельно допустимого уровня; наиболее близка к нему подгруппа с пролётом 200 мм (13,2…13,4). Одновременно нарушено ограничение по ширине $b \leqslant L/4$: у образцов 1г и 8г отношение b/L составляет 0,294 и 0,336, а у образца 6а достигает 0,243 при пределе 0,250. При таких значениях не выполняется условие пренебрежимо малого вклада касательных напряжений, при котором справедливо соотношение (1) [19-21], и разрушение переходит от изгибного к межслойному сдвигу. Формально критерию ступени 2 не удовлетворяет ни один протокол, что прямо отражает ограниченность геометрии образцов, изготавливаемых из готового профиля. Поэтому на ступени 2 применён дифференцированный критерий: абсолютные значения прочности признаются оценочными для всей выборки, а к сопоставлению пар применяется требование постоянства базы сравнения, то есть совпадения всех условий испытания внутри пары. Диаграммы нагружения обеих подгрупп приведены на рис. 4.

Различие двух подгрупп видно непосредственно по форме кривых. В подгруппе образцов, вырезанных вдоль волокон (рис. 4, а), все шесть диаграмм имеют одинаковый вид: протяжённый линейный участок и хрупкое разрушение вблизи максимума, причём кривые, полученные при −60 °C, лежат выше соответствующих кривых при +25 °C для каждой из трёх схем раскроя. В подгруппе об-

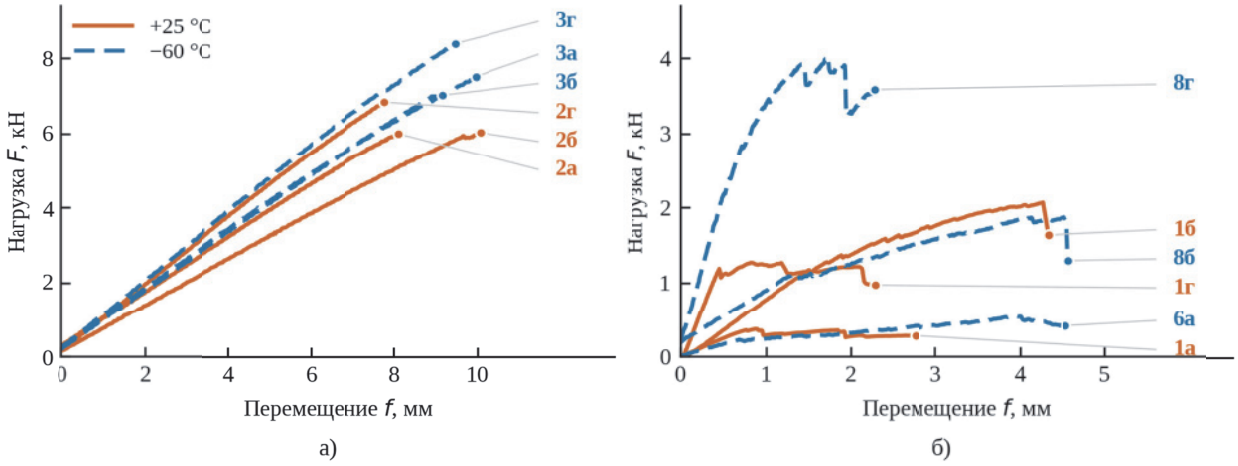

Рис. 4. Диаграммы нагружения образцов:
а – вырезанные вдоль волокон, пролёт 200 мм во всех парах; б – вырезанные поперёк волокон, пролёт и сечение внутри пары не совпадают. Сплошные линии – испытание при +25 °С, штриховые – при −60 °С; перемещение отсчитано от начала нагружения, масштаб по оси нагрузки на панелях различен

разцов, вырезанных поперёк волокон (рис. 4, б), диаграммы несопоставимы ни по уровню нагрузки, ни по достигнутому перемещению, ни по характеру разрушения: наряду с хрупким разрушением наблюдаются протяжённые участки с последовательными сбросами нагрузки.

Различие абсолютных уровней прочности между подгруппами - от 581 до 760 МПа вдоль волокон против 8...164 МПа поперёк - не является признаком ошибки измерения: при поперечной вырезке изгибающий момент воспринимается преимущественно полимерной матрицей, а не армирующим наполнителем, поэтому прочность закономерно ниже на один-два порядка. Существенно другое: внутри каждой пары направление вырезки одинаково, поэтому пары сопоставимы между собой по этому признаку, и различие результатов внутри пары порождается уже не анизотропией материала, а непостоянством геометрии образцов. Количественный результат сопоставления пар приведён на рис. 5, а.

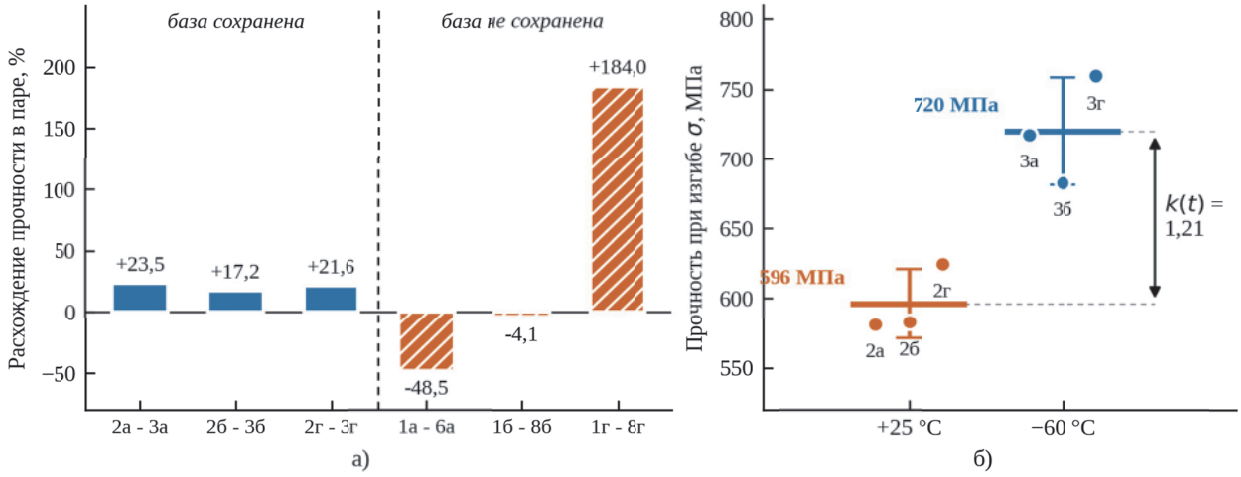

Рис. 5. Результат проверки на ступенях 2 и 5:
а – расхождение прочности при изгибе в сопоставляемых парах образцов при переходе от +25 к −60 °С (первые три пары – вырезка вдоль волокон, вторые три – поперёк); б – прочность образцов принятой подгруппы, средние значения с указанием среднего квадратического отклонения и температурный коэффициент условий работы

Три пары из шести, у которых расстояние между опорами внутри пары совпадает, дают согласованное изменение прочности от +17,2 до +23,5 %. Три пары, у которых расстояние между опорами различается (120 и 100 мм, 190 и 200 мм, 80 и 70 мм), дают расхождение от −48,5 до +184,0 %. Прирост прочности на 184 % при охлаждении на 85 градусов для стеклопластика физически невозможен, что подтверждает корректность решения ступени об отклонении этих пар.

Дополнительно ступень 2 зафиксировала, что фактическая температура образца в протоколе не документируется: приводится номинальное значение −60 °С, тогда как показание измерителя в момент испытания составляло −60,2 °С (рис. 2, в) и в протокол не переносится. Само отклонение находится в пределах допуска, однако проверить это по протоколу невозможно, поэтому несоответствие внесено в классификацию.

Ступень 3 выявила несоответствие для образца 6а (рис. 6, а). Зафиксированный в протоколе экстремум нагрузки составляет 225,65 Н при перемещении 0,7 мм, тогда как нагрузка продолжает возрастать и достигает 533 Н при перемещении 4,0 мм. Занижение составляет 58 %, соответствующее значение прочности при изгибе занижено с 19,4 до 8,2 МПа, то есть более чем в два раза. Зафиксированная точка не отвечает ни одному из трёх способов определения критической нагрузки по пункту 3.3 стандарта [30]: она не совпадает ни с началом отклонения диаграммы от линейной, ни с моментом разрушения образца, ни с точкой пятипроцентного отклонения касательной. Причина –+ срабатывание алгоритма автоматической фиксации максимума на локальном возмущении диаграммы, характерном для композитов при развитии межслойного расслоения.

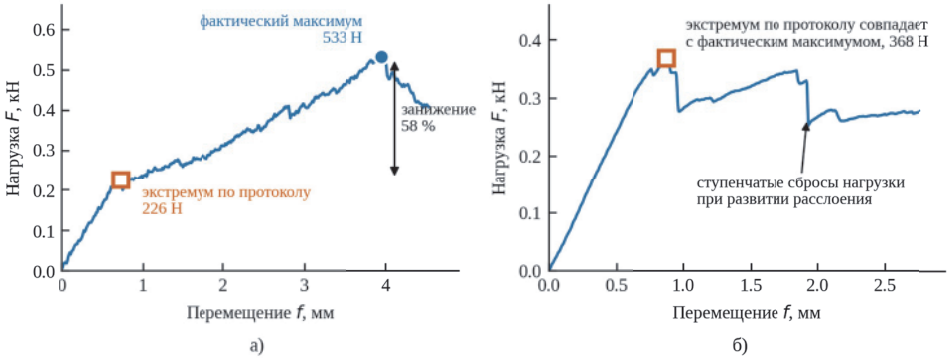

Рис. 6. Проверка экстремума нагрузки на ступени 3:
а - образец 6а, зафиксированный в протоколе экстремум занижен относительно фактического максимума диаграммы; б – образец 1а, зафиксированный экстремум совпадает с фактическим максимумом. Квадрат – экстремум по протоколу, круг – фактический максимум

Характерен и обратный случай (рис. 6, б): диаграмма образца 1а имеет пилообразный вид с двумя ступенчатыми сбросами нагрузки при перемещении 0,9 и 1,9 мм, что соответствует последовательному расслоению. Зафиксированный экстремум совпадает здесь с первым локальным максимумом, который является и глобальным, и потому физически обоснован. Аналогично в протоколах 1г и 8г экстремум отнесён к первому локальному максимуму, а последующие максимумы превышают его не более чем на 5 %, что укладывается в погрешность канала и соответствует физике последовательного расслоения; по критерию ступени 3 эти протоколы принимаются. Тем самым ступень 3 разделяет ошибку алгоритма и действительную особенность разрушения композита.

По итогам прогона система приняла шесть протоколов из двенадцати. Статистические характеристики принятой выборки и значения температурного коэффициента условий работы приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты обработки принятой выборки (образцы, вырезанные вдоль волокон, пролёт 200 мм)

Профиль	σ при +25 °C, МПа	σ при −60 °C, МПа	k(t)	Схема	L/h
Двутавр, полка	581,1	717,4	1,235	А	13,3
Двутавр, стенка	582,7	682,7	1,172	Б	13,3
Труба квадратная	624,8	759,5	1,216	Г	13,4
Среднее по трём схемам	**596,2**	**719,9**	**1,21 ± 0,03**	-	-
Среднее квадратическое отклонение	24,8	38,4	0,03	-	-
Коэффициент вариации, %	4,2	5,3	2,7	-	-

Прирост среднего значения прочности при охлаждении с +25 до −60 °C составляет 20,7 %, коэффициент вариации внутри температурной группы 4,2-5,3 %, коэффициент вариации величины k(t) 2,7 % (рис. 5, б). Температурный коэффициент устойчив по всем трём схемам раскроя, то есть по обеим зонам двутавра и по стенке трубы, а полученный прирост прочности согласуется с данными [13-16]. Отметим, что согласованный результат получен именно на той подгруппе, в которой качество изготовления образцов обеспечило одинаковую геометрию внутри пары; тем самым отбор корректных протоколов является не отбраковкой неудобных данных, а необходимым условием получения самого коэффициента.

Установленные зависимости предназначены для использования в дальнейших расчётах и моделях: значение k(t) передаётся на ступень 7 как коэффициент условий работы. Конечно-элементная

модель сваи в многолетнемёрзлом грунте, в которую передаётся этот результат, построена авторами ранее и верифицирована по данным натурных испытаний буроопускных свай [33, 34]; настоящая работа замыкает на неё контур входного контроля свойств материала.

По результатам прогона построена классификация несоответствий процесса входного контроля ПКМ, приведённая в табл. 3. Метод анализа видов и последствий отказов подробно рассмотрен в обзорах [35, 36] и применяется для оценки риска несоответствий в технологических процессах [37]. Принципиальное отличие настоящей классификации от экспертного построения состоит в способе назначения оценок: вероятность возникновения O назначена по фактической частоте появления несоответствия в выборке по шкале [32], а вероятность необнаружения назначена для двух состояний процесса - D_1 до внедрения системы, когда проверка не формализована, и D_2 после внедрения, по фактическому результату прогона. Экспертной остаётся только значимость последствия S.

Таблица 3. Классификация несоответствий процесса входного контроля ПКМ и оценка риска

№	Вид несоответствия	Последствие	Ступень	S	O	D_1	$ПЧР_1$	D_2	$ПЧР_2$
1	Отклонение геометрии образца от номинальной при изготовлении из профиля	Несопоставимость результатов, смещение оценки прочности	1, 2	7	9	8	504	3	189
2	**Несоответствие отношения L/h и ширины образца требованиям стандарта на метод испытания**	**Разрушение по межслойному сдвигу вместо изгиба, занижение прочности**	**2**	**8**	**10**	**7**	**560**	**2**	**160**
3	Непостоянство базы сравнения внутри сопоставляемой пары	Расхождение результата сравнения до 184 %	2	9	9	8	648	2	162
4	Неверная автоматическая фиксация экстремума нагрузки	Занижение прочности на 58 %	3	8	6	9	432	3	144
5	Диаграмма нагружения приведена в протоколе только в виде изображения	Невозможность определить модуль упругости и проверить экстремум	1	5	10	4	200	1	50
6	Неполнота записи условий испытания в протоколе	Невоспроизводимость условий испытания	1	5	10	4	200	1	50
7	Фактическая температура образца не документируется в протоколе	Непроверяемое смещение температурного коэффициента	2	4	6	8	192	4	96
	Суммарное приоритетное число риска						2736		851

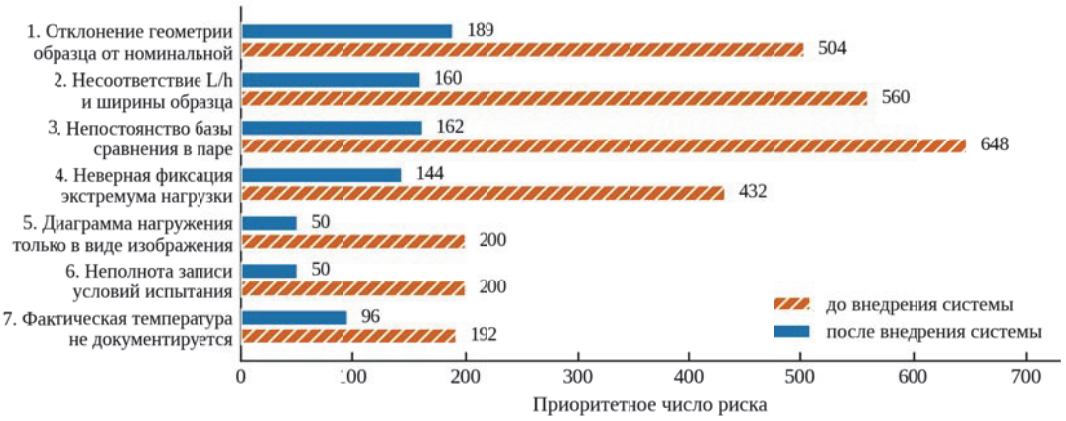

Рис. 7. Приоритетное число риска по видам несоответствий до и после внедрения системы контроля достоверности

Снижение риска по видам несоответствий показано на рис. 7. Суммарное приоритетное число риска уменьшается с 2736 до 851, то есть в 3,2 раза. Высокие значения O для несоответствий 2, 5 и

6 объясняются тем, что они наблюдались во всех без исключения протоколах выборки и отражают не единичные отклонения, а системное свойство процесса входного контроля при отсутствии формализованной процедуры приёмки данных. Наибольшее снижение риска достигается по несоответствиям 3 и 4: первое в отсутствие системы практически не выявляется, поскольку каждый отдельный протокол выглядит корректным и расхождение обнаруживается только при сопоставлении пары, второе не выявляется потому, что значение экстремума заносится в протокол автоматически и не сверяется с диаграммой.

Основной результат работы состоит в количественной оценке цены отсутствия контроля достоверности. При использовании всей выборки без проверки назначение нормативной характеристики опиралось бы на значения, различающиеся почти на два порядка (от 8,2 до 759,5 МПа), причём формально все они получены по одной расчётной формуле для одного материала. Температурный коэффициент по паре 1г - 8г составил бы 2,84, а по паре 1а - 6а - 0,51; любое из этих значений привело бы к грубой ошибке в прогнозе несущей способности.

Отсюда следует практическое правило, применимое за пределами настоящего эксперимента: отступление от стандартной геометрии образца при входном контроле допустимо, изменение условий испытания внутри сопоставляемой пары недопустимо. Нормируется не абсолютный размер образца, а константность базы сравнения.

Правило имеет прямое приложение к методике мониторинга остаточного ресурса ПКМ-свай по образцам-свидетелям, извлекаемым из вспомогательных скважин без демонтажа основной конструкции. Геометрия таких образцов задана буровым инструментом и не может быть приведена к стандартной. Однако если методика мониторинга фиксирует расстояние между опорами, отношение L/h, схему опирания и скорость нагружения как неизменные на всём сроке наблюдения, то ряд результатов, получаемых год за годом из одной скважины, остаётся сопоставимым и пригодным для оценки деградации материала.

Дальнейшее развитие системы связано с автоматизацией ступеней 1-3: методы машинного обучения применяются для предиктивного управления качеством в производстве [38] и для прогнозирования характеристик композитов по экспериментальным выборкам [39], что позволяет перейти от ручной сверки протоколов к автоматизированной проверке всего потока данных входного контроля.

Полученный результат замыкается на исходную постановку. Анализ жизненного цикла выделил проектирование как подпроцесс, наиболее значимый для надёжности и долговечности конструкции, а достоверность исходных данных о свойствах материала - как определяющую его характеристику. Прогон системы показал цену отсутствия контроля этой характеристики: половина протоколов не удовлетворяет критериям достоверности, а решение о пригодности каждого из них до сих пор принималось экспертно. Обеспечение достоверности данных входного контроля тем самым является самостоятельным процессом управления качеством в подпроцессе проектирования, а не вспомогательной операцией.

Ограничения работы. Выборка составляет по одному образцу на комбинацию профиля и температуры, тогда как пункт 6.1.5 стандарта [30] требует не менее пяти образцов, а для анизотропных материалов - по пять на каждое из главных направлений. Это не позволяет назначить нормативное значение как квантиль распределения и требует рассматривать полученные величины как пилотные. Абсолютные значения прочности носят оценочный характер, поскольку отношение L/h во всей выборке ниже предельно допустимого значения 14:1. Модуль упругости при изгибе не определён. Полученный температурный коэффициент относится к направлению вдоль волокон; для поперечного направления назначить его по настоящей выборке нельзя. Результаты отнесены к профилям конкретной поставки, а не к марке материала. Перечисленные ограничения не влияют на основной результат, поскольку он относится к процедуре контроля, а не к значениям характеристик материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Процессным методом проанализирован жизненный цикл ПКМ-сваи от проектирования до утилизации, выделены подпроцессы, влияющие на надёжность и долговечность конструкции, и методом анализа иерархий установлено, что наиболее значимым вызовом подпроцесса проектирования является обеспечение достоверности исходных данных о свойствах материала.

2. Разработана многоступенчатая система контроля достоверности данных входного контроля полимерных композиционных материалов, включающая семь ступеней с формализованными критериями приёмки и независимыми проверками на ступенях извлечения параметров, проверки условий испытания и проверки первичных данных.

3. Апробация системы на выборке из двенадцати протоколов трёхточечного изгиба образцов, изготовленных из двух пултрузионных стеклопластиковых профилей по трём схемам раскроя, показала, что шесть протоколов из двенадцати не удовлетворяют критериям достоверности; расхождение результатов в отклонённых парах составляет от −48,5 до +184,0 %.

4. По принятой выборке получено согласованное значение температурного коэффициента условий работы k(t) = 1,21 ± 0,03 при коэффициенте вариации внутри температурной группы 4,2-5,3 %, что соответствует приросту прочности при изгибе на 20,7 % при охлаждении с +25 до −60 °C.

5. Установлено, что доминирующим фактором недостоверности входного контроля ПКМ является качество изготовления образцов и непостоянство условий испытания внутри сопоставляемой пары, а не само по себе отступление от стандартной геометрии образца. Сформулировано правило константности базы сравнения.

6. Построена классификация несоответствий процесса входного контроля ПКМ из семи видов, в которой вероятность возникновения назначена по фактической частоте появления в выборке, а вероятность необнаружения - по результату прогона системы. Внедрение системы снижает суммарное приоритетное число риска с 2736 до 851, то есть в 3,2 раза.

7. Результаты применимы при разработке методик входного контроля пултрузионных ПКМ-профилей, при формировании требований к протоколам испытаний и при построении методик мониторинга остаточного ресурса ПКМ-свай по образцам-свидетелям в условиях многолетнемёрзлых грунтов.

Установленные зависимости переходят из формы протокола испытания в форму исходных данных расчётной модели. Температурный коэффициент условий работы k(t) = 1,21, полученный по принятой подгруппе, назначается коэффициентом условий работы при задании прочности ПКМ в конечно-элементной модели сваи в многолетнемёрзлом грунте; форма диаграмм нагружения задаёт вид закона деформирования для нелинейного расчёта, а правило постоянства базы сравнения переносится в методику мониторинга остаточного ресурса по образцам-свидетелям. Тем самым многоступенчатая система контроля достоверности замыкает контур «входной контроль материала - расчётная модель конструкции»: в модель попадают только те характеристики, которые прошли формализованную проверку, а каждое отклонённое значение сопровождается указанием основания. Дальнейшая работа авторов связана с автоматизацией ступеней 1-3 и с передачей проверенных характеристик непосредственно в конечно-элементную модель буроопускной сваи [33, 34].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: Минстрой России, 2020. – 132 с.
2. *Shaposhnikov N.O., Shvetsov O.V., Ermakov B.S., Vologzhanina S.A.* Influence of metal structural heterogeneity in a sheet tube billet on forming mechanical properties and crack resistance of steel pipes for operation in the Arctic climate conditions // CIS Iron and Steel Review. – 2024. – Vol. 28. – P. 69-74. - DOI: 10.17580/cisisr.2024.02.12.
3. *Correia J.R., Branco F., Gonilha J., Silva N., Camotim D.* Glass Fibre Reinforced Polymer Pultruded Flexural Members: Assessment of Existing Design Methods // Structural Engineering International. – 2010. – Vol. 20. – № 4. – P. 362-369. – DOI: 10.2749/101686610793557771.
4. *Turvey G.J.* Testing of pultruded glass fibre-reinforced polymer (GFRP) composite materials and structures // Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications. – Woodhead Publishing, – 2013. – P. 440-508. – DOI: 10.1533/9780857098641.3.440.
5. *Салахутдинов, М.А.* Экспериментальные исследования несущей способности балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей / М.А. Салахутдинов, Д.Н. Арипов, А.Р. Ханеков, С.С. Киселев // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19. – № 12. – С. 1883-1895. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895.
6. *Сулейманов, А.М.* Экспериментальное определение значимости воздействия эксплуатационных факторов на полимерную матрицу пултрузионных стеклопластиковых профилей / А.М. Сулейманов, Э.Б. Туйсина // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – Т. 19. – № 2. – С. 98-109. – DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-98-109.
7. *Швецов, О.В.* Использование полимерных композиционных материалов при строительстве и обустройстве месторождений на многолетнемерзлых грунтах / О.В. Швецов, М.П. Лебедев, Б.С. Ермаков, Д.В. Нечаев, И.Д. Карпов // Глобальная энергия. – 2024. – Т. 30, № 4. – С. 74-86. – DOI: 10.18721/JEST.406.
8. *Ермаков, Б.С.* Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур / Б.С. Ермаков, О.В. Швецов, С.А. Вологжанина, Д.В. Нечаев, И.Д. Карпов // Горная промышленность. – 2024. – № S5. – С. 198-203. – DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203.
9. *Buznik V.M., Kablov E.N.* Arctic materials science: Current state and prospects // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 87, – № 5. – P. 397-408. – DOI: 10.1134/S101933161705001X.
10. *Lepov V.V., Okhlopkova A.A.* Materials Science of the North and the Arctic for the industry of the Republic of Sakha (Yakutia) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2023. – Т. 28. – № 4. – С. 627-640. – DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-4-627-640.
11. *Startsev O.V., Kychkin A.K., Lebedev M.P., Polyakov V.V.* Effects of moisture on aging of polymer composite materials in a cold climate // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol. 30. – P. 162-166. – DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.025.
12. *Кычкин, А.К.* Климатическая деградация базальтопластиковых композиционных материалов плоской формы: предельные значения пористости и статистическое моделирование ее формирования / А.К. Кычкин, Н.Ф. Стручков, Г.Г. Винокуров // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. – Т. 30. – № 4. – С. 664-672. – DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-4-644-672.
13. *Ray B.C.* Effects of Thermal and Cryogenic Conditionings on Mechanical Behavior of Thermally Shocked Glass Fiber-Epoxy Composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2005. – Vol. 24. – № 7. – P. 713-717. – DOI: 10.1177/0731684405046081.

14. *Shindo Y., Horiguchi K., Wang R.* Cryomechanics and Short-Beam Interlaminar Shear Strength of G-10CR Glass-Cloth/Epoxy Laminates // Advances in Cryogenic Engineering Materials. – Boston: Springer, 2000. – P. 167-174. – DOI: 10.1007/978-1-4615-4293-3_21.
15. *Wu Z., Li J., Huang C., Li L.* Effect of Matrix Modification on Interlaminar Shear Strength of Glass Fibre Reinforced Epoxy Composites at Cryogenic Temperature // Physics Procedia. - 2015. – Vol. 67. – P. 1068-1073. – DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.202.
16. *Bhanage A., Padmanabhan K.* Sub-zero temperature flexural and flexural fatigue behaviour of glass fabric/epoxy composite tubular anti roll bars // Composites Science and Technology. – 2024. – Vol. 245. – Art. 110324. - DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110324.
17. *Молина, О.В.* Роль цифрового проектирования в стандартизации конструкций из полимерных композитов для Крайнего Севера / О.В. Молина, И.Д. Карпов, Я.В. Спрыгина // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2026. – № 3 (90). – С. 110-118. – EDN: WEVARC.
18. *Иванова, Г.В.* Влияние термообработки на структурные, механические и триботехнические характеристики полиэфирэфиркетона (PEEK), изготовленного методом послойного наплавления (FDM) / Г.В. Иванова, Г.В. Цветкова, А.И. Колотий, А.М. Левитский, В.Д. Андреева // Вопросы материаловедения. – 2026. – № 2 (126). – С. 125-136. – EDN: QTUQOG.
19. *Pandey P.K., Singh K.K., Gaurav A.* Effect of Span-to-Depth Ratio on the Flexural Properties of Woven Neat Epoxy/Glass Fiber-Reinforced Polymer Symmetric Laminates // Trends in Materials Engineering. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering. - Singapore: Springer, 2019. – P. 59-65. – DOI: 10.1007/978-981-13-9016-6_7.
20. *Mujika F.* On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests // Polymer Testing. – 2006. – Vol. 25. – № 2. – P. 214-220. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2005.10.006.
21. *Cui W., Wisnom M.R., Jones M.* Effect of specimen size on interlaminar shear strength of unidirectional carbon fibre-epoxy // Composites Engineering. – 1994. – Vol. 4. – № 3. – P. 299-307. – DOI: 10.1016/0961-9526(94)90080-9.
22. *Wisnom M.R., Atkinson J.W.* Reduction in tensile and flexural strength of unidirectional glass fibre-epoxy with increasing specimen size // Composite Structures. – 1997. – Vol. 38, № 1-4. – P. 405-411. – DOI: 10.1016/S0263-8223(97)00075-5.
23. *Gao Y., Ling Z., Zhou Y., Lin Z., Gong C.* Size-Dependent Strength and Failure Mechanisms of Cross-Ply Thick Composite Laminates Under Flexural and Interlaminar Shear Loading // Polymer Composites. – 2026. – Vol. 47. – № 12. – P. 10873-10886. – DOI: 10.1002/pc.70992.
24. *Graba M.* Evaluation of measurement uncertainty in a static tensile test // Open Engineering. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 709-722. – DOI: 10.1515/eng-2021-0069.
25. *Dong C.* Uncertainties in flexural strength of carbon/glass fibre reinforced hybrid epoxy composites // Composites Part B: Engineering. - 2016. - Vol. 98. - P. 176-181. - DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.05.035.
26. *Логанина, В.И.* Контроль качества строительных материалов и изделий с учетом неопределенности измерения и стабильности технологического процесса производства / В.И. Логанина, А.А. Милькина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – Т. 3. – № 10. – С. 6-9. – DOI: 10.12737/article_5bd95a6fa953e6.23106620.
27. *Osman S.M., Khaled K.M.* Proposal for improving force testing machines calibration standards // Measurement. – 2019. – Vol. 146. – P. 643-652. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.07.002.
28. *Saaty T.L.* Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal of Services Sciences. – 2008. – Vol. 1. – № 1. – P. 83-98. - DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
29. *Darko A., Chan A.P.C., Ameyaw E.E., Owusu E.K., Pärn E., Edwards D.J.* Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction // International Journal of Construction Management. – 2019. – Vol. 19. – № 5. – P. 436-452. – DOI: 10.1080/15623599.2018.1452098.
30. ГОСТ Р 56810-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов. – М.: Стандартинформ, 2016. – 19 с.
31. ГОСТ Р 27.303-2021 (МЭК 60812:2018). Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 44 с.
32. ГОСТ Р 51814.2-2001. Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. – М.: Госстандарт России, 2001. – 24 с.
33. *Карпов, И.Д.* Повышение качества строительства фундаментов на многолетних мерзлых грунтах. Сравнение результатов численного анализа цифровых моделей с результатами натурных испытаний буроопускных свай на ММГ / И.Д. Карпов, Ю.С. Клочков, Б.С. Ермаков, С.Б. Ермаков, А.А. Альхименко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 6 (128). – С. 166-175. – EDN: UOYHQH.
34. *Карпов, И.Д.* Повышение качества строительства фундаментов на многолетних мерзлых грунтах на основе компьютерного моделирования устойчивости буроопускных свай / И.Д. Карпов, Б.С. Ермаков, С.Б. Ермаков, О.В. Швецов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 2. – С. 79-88. – EDN: DKMRCE.
35. *Liu H.-C., Liu L., Liu N.* Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review // Expert Systems with Applications. – 2013. – Vol. 40. – № 2. – P. 828-838. - DOI: 10.1016/j.eswa.2012.08.010.
36. *Spreafico C., Russo D., Rizzi C.* A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents // Computer Science Review. – 2017. – Vol. 25. – P. 19-28. – DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.05.002.
37. *Knop K.* Analysis of risk of nonconformities and applied quality inspection methods in the process of aluminium profiles coating based on FMEA results // Production Engineering Archives. – 2017. – Vol. 16. – P. 16-21. – DOI: 10.30657/pea.2017.16.04.
38. *Tercan H.,* Meisen T. Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2022. – Vol. 33. – № 7. – P. 1879-1905. – DOI: 10.1007/s10845-022-01963-8.
39. *Rahman M.M., Ismail A.E., Ramli M.F., Rashid A.H.A.* Predicting flexural properties of fiber reinforced composites: An experimental dataset analysis using machine learning models // Next Materials. – 2026. – Vol. 11. – Art. 101720. – DOI: 10.1016/j.nxmate.2026.101720.

A MULTI-STAGE DATA RELIABILITY CONTROL SYSTEM FOR THE VERIFICATION OF THE QUALITY MODEL OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN PERMAFROST FOUNDATION STRUCTURES

© 2026 I.D. Karpov[1], Yu.S. Klochkov[2], B.S. Ermakov[1], S.B. Ermakov[2], A.A. Alkhimenko[1]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Scientific and Technological Complex «New Technologies and Materials», St. Petersburg, Russia

[2] Tyumen Industrial University, Center for Technological Initiatives, Tyumen, Russia

The paper addresses data reliability in the incoming inspection of polymer composite materials (PCM) used in foundation structures on permafrost. Since design resistances of PCM are not established by the current regulatory framework, incoming inspection becomes the only source of the data used in verifying the quality model of structures operating in permafrost. It is shown that specimen manufacturing quality and compliance with the test conditions turn into an independent factor governing the usability of the obtained values. The object of study is the incoming inspection process itself. A multi-stage data reliability control system is proposed, comprising seven sequential stages, from parameter extraction from the test report to transfer of the verified result to a finite element model of the foundation structure. The system was validated on a set of twelve three-point bending test reports for specimens manufactured from two pultruded glass fibre reinforced polymer profiles using three cutting schemes and tested at +25 and −60 °C, with specimens cut both along and across the fibre direction in each cutting scheme. The run showed that six of the twelve reports fail the reliability criteria: the span-to-depth ratio ranges from 6.8 to 13.4 against a nominal 16:1 and an absolute lower limit of 14:1, two specimens violate the width limit, in three compared pairs the comparison base is not maintained, and in one report the automatically recorded peak load is 58 % below the actual maximum of the loading curve. The discrepancy in the rejected pairs ranges from −48.5 to +184.0 %, whereas the accepted subset of six reports, all cut along the fibre direction, yields a consistent temperature service factor k(t) = 1.21 ± 0.03 with a coefficient of variation within the temperature group of 4.2-5.3 %. Based on the run, a classification of incoming inspection process nonconformities comprising seven types was constructed, in which the occurrence rating is assigned from the actual frequency observed in the sample and the detection rating from the result of the system run. The total risk priority number decreases from 2736 to 851, that is by a factor of 3.2. The results are applicable to the development of PCM incoming inspection procedures and to residual life monitoring procedures for PCM piles using witness specimens.

Keywords: quality management, incoming inspection, polymer composite materials, pultrusion, permafrost, data reliability, FMEA, nonconformity classification, three-point bending, sub-zero temperatures.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-187-200
EDN: SPQGRB

REFERENCES

1. SP 25.13330.2020. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlyh gruntah. – M.: Minstroj Rossii, 2020. – 132 s.
2. *Shaposhnikov N.O., Shvetsov O.V., Ermakov B.S., Vologzhanina S.A.* Influence of metal structural heterogeneity in a sheet tube billet on forming mechanical properties and crack resistance of steel pipes for operation in the Arctic climate conditions // CIS Iron and Steel Review. – 2024. – Vol. 28. – P. 69-74. - DOI: 10.17580/cisisr.2024.02.12.
3. *Correia J.R., Branco F., Gonilha J., Silva N., Camotim D.* Glass Fibre Reinforced Polymer Pultruded Flexural Members: Assessment of Existing Design Methods // Structural Engineering International. – 2010. – Vol. 20. – № 4. – P. 362-369. – DOI: 10.2749/101686610793557771.
4. *Turvey G.J.* Testing of pultruded glass fibre-reinforced polymer (GFRP) composite materials and structures // Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications. – Woodhead Publishing, – 2013. – P. 440-508. – DOI: 10.1533/9780857098641.3.440.
5. *Salahutdinov, M.A.* Eksperimental'nye issledovaniya nesushchej sposobnosti balok sostavnogo dvutavrovogo secheniya iz pultruzionnyh stekloplastikovyh profilej / M.A. Salahutdinov, D.N. Aripov, A.R. Hanekov, S.S. Kiselev // Vestnik MGSU. – 2024. – T. 19. – № 12. – S. 1883-1895. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895.
6. *Sulejmanov, A.M.* Eksperimental'noe opredelenie znachimosti vozdejstviya ekspluatacionnyh faktorov na polimernuyu matricu pultruzionnyh stekloplastikovyh profilej / A.M. Sulejmanov, E.B. Tujsina // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2022. – T. 19. – № 2. – S. 98-109. – DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-98-109.
7. *Shvecov, O.V.* Ispol'zovanie polimernyh kompozicionnyh materialov pri stroitel'stve i obustrojstve mestorozhdenij na mnogoletnemerzlyh gruntah / O.V. Shvecov, M.P. Lebedev, B.S. Ermakov, D.V. Nechaev, I.D. Karpov // Global'naya energiya. – 2024. – T. 30, № 4. – S. 74-86. – DOI: 10.18721/JEST.406.
8. *Ermakov, B.S.* Vliyanie vodoottalkivayushchego pokrytiya na rabotosposobnost' konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov v usloviyah ekstremal'no nizkih temperatur / B.S. Ermakov, O.V. Shvecov, S.A. Vologzhanina, D.V. Nechaev, I.D. Karpov // Gornaya promyshlennost'. – 2024. – № S5. – S. 198-203. – DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203.
9. *Buznik V.M., Kablov E.N.* Arctic materials science: Current state and prospects // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 87, – № 5. – P. 397-408. – DOI: 10.1134/S101933161705001X.
10. *Lepov V.V., Okhlopkova A.A.* Materials Science of the North and the Arctic for the industry of the Republic of Sakha (Yakutia) // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. – 2023. – T. 28. – № 4. – S. 627-640. – DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-4-627-640.
11. *Startsev O.V., Kychkin A.K., Lebedev M.P., Polyakov V.V.* Effects of moisture on aging of polymer composite materials in a cold climate // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol. 30. – P. 162-166. – DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.025.
12. *Kychkin, A.K.* Klimaticheskaya degradaciya bazal'toplastikovyh kompozicionnyh materialov ploskoj formy: predel'nye znacheniya poristosti i statisticheskoe modelirovanie ee formirovaniya / A.K. Kychkin, N.F. Struchkov, G.G. Vinokurov // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. – 2025. – T. 30. – № 4. – S. 664-672. – DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-4-644-672.

13. *Ray B.C.* Effects of Thermal and Cryogenic Conditionings on Mechanical Behavior of Thermally Shocked Glass Fiber-Epoxy Composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2005. – Vol. 24. – № 7. – P. 713-717. – DOI: 10.1177/0731684405046081.
14. *Shindo Y., Horiguchi K., Wang R.* Cryomechanics and Short-Beam Interlaminar Shear Strength of G-10CR Glass-Cloth/Epoxy Laminates // Advances in Cryogenic Engineering Materials. – Boston: Springer, 2000. – P. 167-174. – DOI: 10.1007/978-1-4615-4293-3_21.
15. *Wu Z., Li J., Huang C., Li L.* Effect of Matrix Modification on Interlaminar Shear Strength of Glass Fibre Reinforced Epoxy Composites at Cryogenic Temperature // Physics Procedia. - 2015. – Vol. 67. – P. 1068-1073. – DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.202.
16. *Bhanage A., Padmanabhan K.* Sub-zero temperature flexural and flexural fatigue behaviour of glass fabric/epoxy composite tubular anti roll bars // Composites Science and Technology. – 2024. – Vol. 245. – Art. 110324. - DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110324.
17. *Molina, O.V.* Rol' cifrovogo proektirovaniya v standartizacii konstrukcij iz polimernyh kompozitov dlya Krajnego Severa / O.V. Molina, I.D. Karpov, Ya.V. Sprygina // Informacionno-ekonomicheskie aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya. – 2026. – № 3 (90). – S. 110-118. – EDN: WEVARC.
18. *Ivanova, G.V.* Vliyanie termoobrabotki na strukturnye, mekhanicheskie i tribotekhnicheskie harakteristiki poliefirefirketona (PEEK), izgotovlennogo metodom poslojnogo naplavleniya (FDM) / G.V. Ivanova, G.V. Cvetkova, A.I. Kolotij, A.M. Levitskij, V.D. Andreeva // Voprosy materialovedeniya. – 2026. – № 2 (126). – S. 125-136. – EDN: QTUQOG.
19. *Pandey P.K., Singh K.K., Gaurav A.* Effect of Span-to-Depth Ratio on the Flexural Properties of Woven Neat Epoxy/Glass Fiber-Reinforced Polymer Symmetric Laminates // Trends in Materials Engineering. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering. - Singapore: Springer, 2019. – P. 59-65. – DOI: 10.1007/978-981-13-9016-6_7.
20. *Mujika F.* On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests // Polymer Testing. – 2006. – Vol. 25. – № 2. – P. 214-220. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2005.10.006.
21. *Cui W., Wisnom M.R., Jones M.* Effect of specimen size on interlaminar shear strength of unidirectional carbon fibre-epoxy // Composites Engineering. – 1994. – Vol. 4. – № 3. – P. 299-307. – DOI: 10.1016/0961-9526(94)90080-9.
22. *Wisnom M.R., Atkinson J.W.* Reduction in tensile and flexural strength of unidirectional glass fibre-epoxy with increasing specimen size // Composite Structures. – 1997. – Vol. 38, № 1-4. – P. 405-411. – DOI: 10.1016/S0263-8223(97)00075-5.
23. *Gao Y., Ling Z., Zhou Y., Lin Z., Gong C.* Size-Dependent Strength and Failure Mechanisms of Cross-Ply Thick Composite Laminates Under Flexural and Interlaminar Shear Loading // Polymer Composites. – 2026. – Vol. 47. – № 12. – P. 10873-10886. – DOI: 10.1002/pc.70992.
24. *Graba M.* Evaluation of measurement uncertainty in a static tensile test // Open Engineering. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 709-722. – DOI: 10.1515/eng-2021-0069.
25. *Dong C.* Uncertainties in flexural strength of carbon/glass fibre reinforced hybrid epoxy composites // Composites Part B: Engineering. - 2016. - Vol. 98. - P. 176-181. - DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.05.035.
26. *Loganina, V.I.* Kontrol' kachestva stroitel'nyh materialov i izdelij s uchetom neopredelennosti izmereniya i stabil'nosti tekhnologicheskogo processa proizvodstva / V.I. Loganina, A.A. Mil'kina // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. – 2018. – T. 3. – № 10. – S. 6-9. – DOI: 10.12737/article_5bd95a6fa953e6.23106620.
27. *Osman S.M., Khaled K.M.* Proposal for improving force testing machines calibration standards // Measurement. – 2019. – Vol. 146. – P. 643-652. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.07.002.
28. *Saaty T.L.* Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal of Services Sciences. – 2008. – Vol. 1. – № 1. – P. 83-98. - DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
29. *Darko A., Chan A.P.C., Ameyaw E.E., Owusu E.K., Pärn E., Edwards D.J.* Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction // International Journal of Construction Management. – 2019. – Vol. 19. – № 5. – P. 436-452. – DOI: 10.1080/15623599.2018.1452098.
30. GOST R 56810-2015. Kompozity polimernye. Metod ispytaniya na izgib ploskih obrazcov. – M.: Standartinform, 2016. – 19 s.
31. GOST R 27.303-2021 (MEK 60812:2018). Nadezhnost' v tekhnike. Analiz vidov i posledstvij otkazov. – M.: Rossijskij institut standartizacii, 2021. – 44 s.
32. GOST R 51814.2-2001. Sistemy kachestva v avtomobilestroenii. Metod analiza vidov i posledstvij potencial'nyh defektov. – M.: Gosstandart Rossii, 2001. – 24 s.
33. *Karpov, I.D.* Povyshenie kachestva stroitel'stva fundamentov na mnogoletnih merzlyh gruntah. Sravnenie rezul'tatov chislennogo analiza cifrovyh modelej s rezul'tatami naturnyh ispytanij buroopusknyh svaj na MMG / I.D. Karpov, Yu.S. Klochkov, B.S. Ermakov, S.B. Ermakov, A.A. Al'himenko // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2025. – T. 27. – № 6 (128). – S. 166-175. – EDN: UOYHQH.
34. *Karpov, I.D.* Povyshenie kachestva stroitel'stva fundamentov na mnogoletnih merzlyh gruntah na osnove komp'yuternogo modelirovaniya ustojchivosti buroopusknyh svaj / I.D. Karpov, B.S. Ermakov, S.B. Ermakov, O.V. Shvecov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2026. – № 2. – S. 79-88. – EDN: DKMRCE.
35. *Liu H.-C., Liu L., Liu N.* Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review // Expert Systems with Applications. – 2013. – Vol. 40. – № 2. – P. 828-838. - DOI: 10.1016/j.eswa.2012.08.010.
36. *Spreafico C., Russo D., Rizzi C.* A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents // Computer Science Review. – 2017. – Vol. 25. – P. 19-28. – DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.05.002.
37. *Knop K.* Analysis of risk of nonconformities and applied quality inspection methods in the process of aluminium profiles coating based on FMEA results // Production Engineering Archives. – 2017. – Vol. 16. – P. 16-21. – DOI: 10.30657/pea.2017.16.04.
38. *Tercan H., Meisen T.* Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2022. – Vol. 33. – № 7. – P. 1879-1905. – DOI: 10.1007/s10845-022-01963-8.
39. *Rahman M.M., Ismail A.E., Ramli M.F., Rashid A.H.A.* Predicting flexural properties of fiber reinforced composites: An experimental dataset analysis using machine learning models // Next Materials. – 2026. – Vol. 11. – Art. 101720. – DOI: 10.1016/j.nxmate.2026.101720.

Ivan Karpov. E-mail: karpov_id@spbstu.ru
Yuri Klochkov, Doctor of Engineering Sciences. E-mail: general@tyuiu.ru
Boris Ermakov, Doctor of Engineering Sciences. E-mail: ermakov55@bk.ru
Sergey Ermakov, Candidate of Engineering Sciences. E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru
Aleksey Alkhimenko, Candidate of Engineering Sciences. E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru