

На правах рукописи



Петухова Екатерина Алексеевна

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ СОСТАВА ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена на кафедре метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель:

Фролова Елена Александровна
доктор технических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:**

Микаева Светлана Анатольевна,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электротехнических систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет».

Семенова Маргарита Игоревна,
кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит. А

Защита диссертации состоится «16» декабря 2025 г., в 16-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета https://dissov.guap.ru/defense/petuhova_ea.

Автореферат разослан «22» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.02
Кандидат технических наук, доцент



С.А. Назаревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения стратегических задач технологического развития, обозначенных в Указе Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития до 2030 года», где одной из ключевых целей является достижение технологического лидерства. В рамках этой задачи создано 8 национальных проектов, одним из которых является проект, посвященный новым материалам и переходу к современным технологиям их проектирования и производства.

В условиях глобальной конкуренции за технологическое лидерство особую значимость приобретает совершенствование полимерных композиционных материалов, сочетающих высокую механическую прочность при малом весе, коррозионную стойкость и выдающиеся диэлектрические свойства. Эти характеристики делают их незаменимыми в авиа- и судостроении, энергетике, электронике и других критически важных отраслях, где снижение массы конструкций напрямую влияет на энергоэффективность и экологичность.

Однако ключевой проблемой процесса разработки и оптимизации состава полимерных композиционных материалов заключается в необходимости балансировки различных физико-механических и электрических характеристик, когда улучшение одних свойств может привести к ухудшению других.

Традиционные методы подбора оптимального состава, основанные на многочисленных физических экспериментах, требуют значительных временных и материальных затрат. Кроме того, они сопровождаются образованием большого количества отходов, что противоречит принципам экологической устойчивости, закрепленным в национальном проекте «Экологическое благополучие».

Согласно Стратегии развития информационного общества (Указ № 203 от 09.05.2017) цель которой - внедрение цифровых технологий и анализ больших данных, актуальна разработка методики диагностики состава полимерных композиционных материалов на основе машинного обучения, внедрение которой, позволит определять состав материалов с требуемыми механическими свойствами при сохранении заданных электрических характеристик, что значительно сократит расходы на сырье и вспомогательные материалы для создания полимерных композиционных материалов, снизить необходимость в частом физическом тестировании и диагностировании образцов, а также минимизировать количество ненужных расходов ресурсов, брака и отходов.

Степень разработанности работы.

Следует выделить ряд работ и авторов, которые внесли значительный вклад в разработку методов контроля и диагностики полимерных композиционных материалов, например исследованиями методов разрушающего контроля полимерных композиционных материалов занимались такие ученые как: Т. А. Охлопкова, Р. В. Борисова, А. Ал. Охлопкова, А. А. Дьяконов, А. П. Васильев, Л. А. Бохоева, П. В. Новосельцев, В. Ю. Курохтин, Delmonte J., Sajan S., Selvaraj D. P.

Изучением методов испытаний на электрические свойства полимерных композиционных материалов занимались М.Ю. Васильков, Е.А. Бусыгина, Л.В. Никитина, И.Д. Кособудский, Т. А. Тунеков, С. В. Жирнов, В. С. Лагунов, Ф. С. Сенатов, Folorunso O, Osterberg P. M

Анализом диагностики полимерных композиционных материалов занимались В.В. Мурашов, А.Ф. Румянцев, Г.А. Иванова, Н.Г. Файзрахманов, А.С. Генералов, В.В. Мурашов, М.А. Далин, А.С. Бойчук, Wrobel G., Stabik J., Rojek M.

Вопросы внедрения машинного обучения в методы контроля и диагностики полимерных композиционных материалов исследованы в работах как зарубежных (Lei Tao, Guang Chen, Ying Li, Kevin Breuer, Markus Stommel), так и отечественных ученых (А. С. Чепурненко, Т. Н. Кондратьева, А. Р. Сагдиев, В. В. Некрасов).

Несмотря на значительный объем работ, посвященных отдельным аспектам традиционных методов диагностики состава полимерных композиционных материалов,

остается недостаточно разработанным комплексный подход, направленный на совершенствование диагностики состава полимерных композиционных материалов с целью минимизации недостатков, заключающихся в большом количестве экспериментальных испытаний, значительных затратах времени и ресурсов, а также в образовании большого количества отходов.

Цель работы: совершенствование диагностики состава полимерных композиционных материалов с заданными механическими свойствами при сохранении электрических характеристик, способствующее уменьшению трудоемкости, финансовых затрат проведения испытаний на растяжение, повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

Объект исследования: диагностика состава полимерных композиционных материалов.

Предмет исследования: модели и методики совершенствования диагностики состава полимерных композиционных материалов с заданными механическими свойствами при сохранении электрических характеристик.

Указанная цель определила постановку и решение следующих **задач**:

1. Разработать математическую модель определения механических, электрических свойств полимерных композиционных материалов, способствующую улучшению эксплуатационных характеристик изделий, повышению экологической безопасности окружающей среды.

2. Разработать модель автоматизации определения состава полимерных композиционных материалов с заданными механическими свойствами, при сохранении электрических характеристик, для снижения трудоемкости испытаний на растяжение, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды.

3. Разработать методику диагностики состава полимерных композиционных материалов с заданными механическими свойствами, при сохранении электрических характеристик, способствующая уменьшению трудоемкости, финансовых затрат проведения испытаний на растяжение, повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

Методы исследования: методы линейной регрессии, случайный лес, градиентный бустинг, метод опорных векторов, методы кластеризации.

Программные средства реализации диссертационного исследования: Microsoft Office, Excel, Visio; PostgreSQL; Python.

Область исследования: соответствует пп. 1,4,7 паспорта специальности 2.2.8 - «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель определения механических и электрических свойств полимерных композиционных материалов, способствующая улучшению эксплуатационных характеристик изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды.

2. Модель автоматизации определения состава полимерного композиционного материала с заданными механическими свойствами при сохранении электрических характеристик, способствующая снижению трудоёмкости испытаний на растяжение, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды.

3. Методика диагностики состава полимерных композиционных материалов с заданными механическими свойствами при сохранении электрических характеристик, способствующая уменьшению трудоемкости, финансовых затрат проведения испытаний на растяжение, повышению надёжности материалов и обеспечению экологической безопасности окружающей среды.

Научная новизна:

1. Разработанная математическая модель определения механических и электрических свойств полимерных композиционных материалов, в отличие от известных

позволяет комплексно оценивать механические и электрические параметры материалов, учитывает их взаимосвязь, что способствует улучшению эксплуатационных характеристик изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды.

2. Разработанная модель автоматизации определения состава полимерного композиционного материала, с заданными механическими свойствами, при сохранении электрических характеристик, в отличие от известных позволяет снизить трудоёмкость испытаний на растяжение, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды.

3. Разработанная методика диагностики состава полимерных композиционных материалов с заданными механическими свойствами при сохранении электрических характеристик, в отличие от известных способствует уменьшению трудоемкости, финансовых затрат проведения испытаний на растяжение, повышению надёжности изделий и обеспечению экологической безопасности окружающей среды.

Практическая значимость

1. Разработанная математическая модель определения механических и электрических свойств полимерных композиционных материалов продемонстрировала высокую эффективность при работе с данными полимерных композитов, позволила определять значения свойств полимерных композиционных материалов и сократить число экспериментов на 35%, обеспечивая экономию 80% времени.

2. Внедрение информационной модели определения состава полимерного композиционного материала позволило сократить сроки подбора оптимального состава полимерного композиционного материала с 2 месяцев до 2 недель. Достигнуто ускорение процесса определения состава на 84-88%, а также сокращение объема лабораторных исследований на 60-62%.

3. Внедрение методики диагностики состава полимерных композиционных материалов позволило сократить время на разработку рецептур состава материала на 90-95%. Затраты на проведения испытаний на растяжение снизились на 80-90%.

Теоретическая значимость

Выявление зависимости между составом материала и его механическими и электрическими свойствами при помощи линейной регрессии. Группировка материалов по схожим характеристикам для оптимизации выбора состава с помощью методов кластеризации.

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью применяемого математического аппарата, методов машинного обучения, анализа данных с использованием федеральных нормативно-правовых и нормативно-технических документов, а также официальных статистических источников, подтверждается результатами практической апробации.

Личный вклад автора заключается в непосредственной разработке основных положений, выносимых на защиту.

Результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность ООО «ИндуТех», ООО «Масштаб», ООО «Центр инженерии, механики и робототехники», ООО «ПАНТЕС», что подтверждено соответствующими актами. Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе ФГАОУ ВО «ГУАП» по дисциплинам «Физико-химические измерения» «Основы искусственного интеллекта в профессиональной деятельности».

Апробация работы

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на VI международном форуме «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» 2023, 2024г, 2025г.; Международном форуме «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве» 2024 г.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 24 научные работы, в том числе: 9 работ в рецензируемых научных изданиях ВАК, из них 5 без соавторов, 12 работ

в других изданиях, получено 1 свидетельство о регистрации базы данных, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации: диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, и приложений. Содержание работы изложено на 159 стр. (9,9 п.л.) машинописного текста, включая 41 рисунок и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показаны ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы цель и задачи.

В первом разделе проведен комплексный анализ современного состояния полимерных композиционных материалов, включая их определение, классификацию, ключевые характеристики и области применения. Проведен анализ современного состояния рынка полимерных композиционных материалов.

Дано описание структуры полимерных композиционных материалов, состоящих из полимерного связующего и наполнителей (рис.1), с акцентом на их взаимодействии, обеспечивающем уникальные свойства конечного продукта.

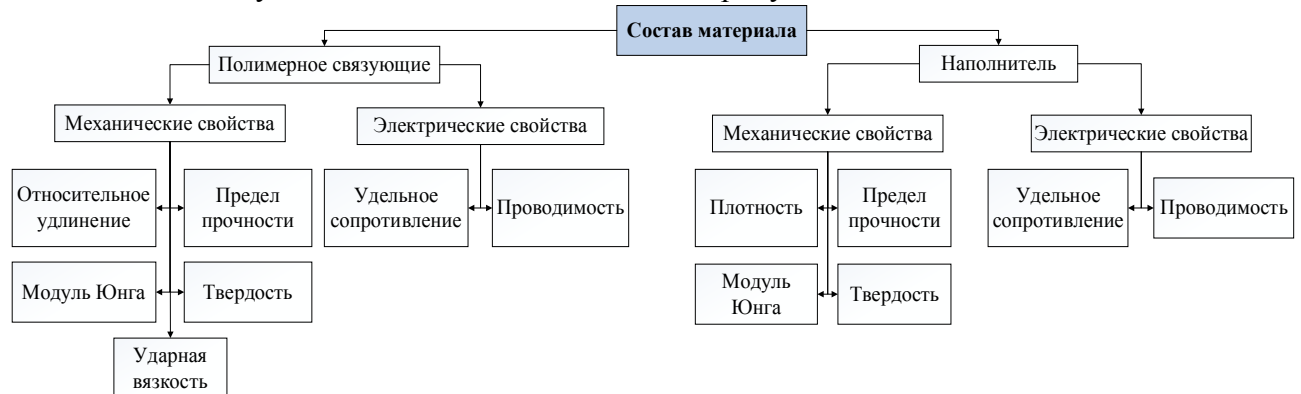


Рисунок 1 – Состав полимерного композиционного материала

Рассмотрена классификация наполнителей и их влияние на механические и электрические свойства композиционных материалов. Подробно исследованы методы оценки механических (ГОСТ Р 56810-2015, ГОСТ 11262-2017) и электрических (ГОСТ Р 50499-93, ГОСТ 22372-77) характеристик полимерных композиционных материалов, включая формулы расчета ключевых параметров. Выявлены существенные ограничения существующих методов диагностики такие как разрушающий характер испытаний, высокая ресурсоемкость, недостаточная чувствительность к локальным неоднородностям и экологические проблемы, связанные с использованием токсичных реагентов и образованием отходов.

Особое внимание уделено проблемам испытаний на растяжение как критически важного метода оценки эксплуатационных характеристик полимерных композиционных материалов, подчеркнута необходимость разработки новых подходов для снижения трудоемкости, финансовых затрат и экологической нагрузки при сохранении точности диагностики.

Второй раздел посвящен разработке математической модели определения механических и электрических свойств полимерных композиционных материалов.

Рассмотрено влияние состава полимерных композиционных материалов (связующего и наполнителя) на их итоговые свойства. (рис. 2).

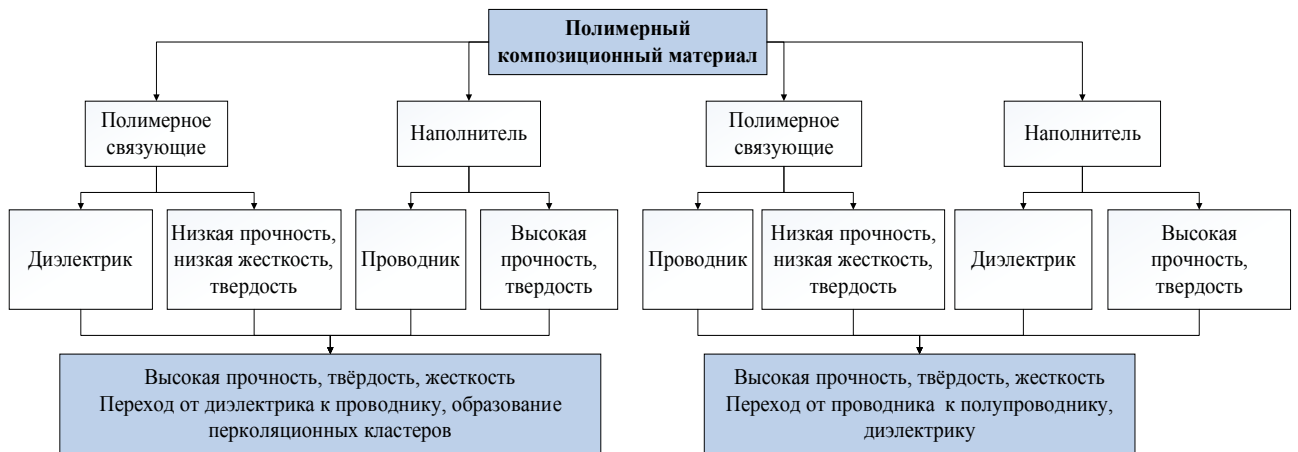


Рисунок 2 – Влияние состава полимерного композиционного материала на свойства

Проведен анализ существующих наборов данных полимерных композиционных материалов, такие как PoLyInfo и ChemProps, содержащие информацию о свойствах, составах и применении полимерных композиционных материалов.

Однако данные базы данных имеют ряд ограничений, включая возможные неточности данных и ограниченный доступ из-за платных подписок, а также не позволяют комплексно оценивать механические и электрические параметры материалов, не учитывают их взаимосвязь.

Разработана математическая модель определения механических и электрических свойств полимерных композиционных материалов (рис. 3).

Модель основана на формулах, объединяющих кластеризацию данных и прогнозирование целевых свойств полимерных композиционных материалов. Для разделения данных на кластеры применяется метод k-средних.

Для каждого кластера применяется регрессионная модель, выбираемая на основе минимизации среднеквадратичной ошибки (MSE). Разработанная математическая модель позволяет точно определить механических электрические свойства полимерных композиционных материалов

$$Y(t) = \left\{ \begin{array}{l} C(X) = \arg \min_s \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 \rightarrow \{S_1, S_2, \dots, S_k\} \\ \hat{y}_i = f_i(X_i) = \arg \min_{f \in F} MSE(f, X, y) \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где F — множество методов:

Линейная регрессия, случайный лес, градиентный бустинг, метод опорных векторов,

) — алгоритм кластеризации K-means;

$S_2, \dots, S_k$ — кластеры материалов с близкими свойствами;

μ_i - центроид кластера i;

— выбранный метод прогнозирования

Был создан расширенный набор данных, включающий механические и электрические свойства для более 500 композиционных материалов.

Сбор информации о свойствах материалов проходил из открытых источников, в набор данных включались результаты исследований механических и электрических свойств полимерных композиционных материалов.

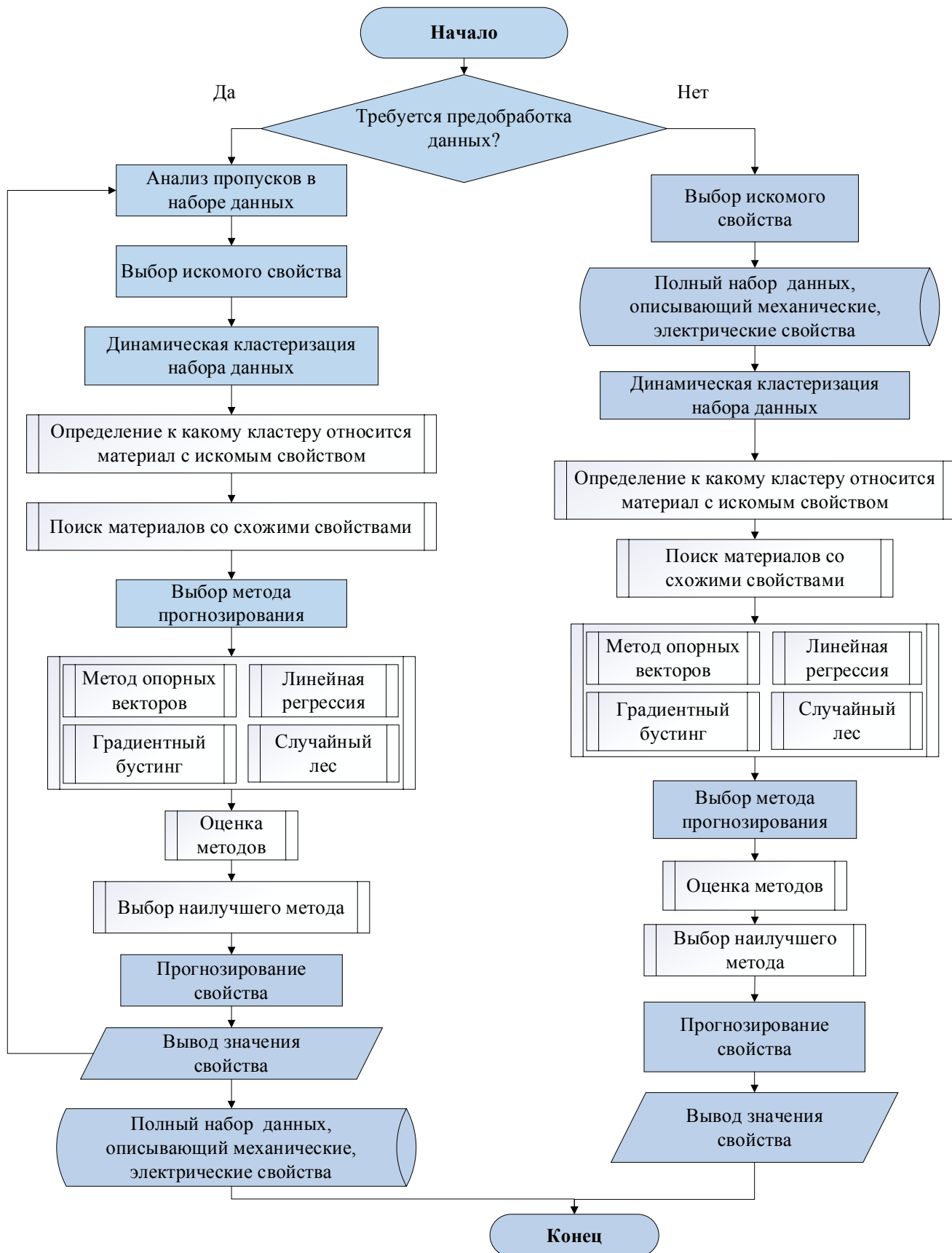


Рисунок 3 – Математическая модель определения механических и электрических свойств полимерных композиционных материалов

Следует отметить, что в некоторых источниках необходимые данные характеристик полимерных композиционных материалов, не были предоставлены в полной мере что привело к возникновению пустых значений в наборе данных. Для устранения этих пробелов было применено прогнозирование недостающих данных с использованием динамической кластеризации (k-средних и иерархическая) и метода линейной регрессии.

Кластерный анализ позволил выделить шесть групп материалов со схожими свойствами, что подтвердило наличие устойчивых зависимостей между составом и эксплуатационными параметрами. Оценка качества кластеризации проводилась с помощью коэффициента силуэта:

$$S_{(x_i)} = \frac{B(x_i) - A(x_i)}{\max(B(x_i), A(x_i))}, \quad (2)$$

где: $A(x_i)$ — среднее расстояние от объекта до всех других объектов в том же кластере. Это значение показывает, насколько близки объекты внутри одного кластера.

$B(x_i)$ — минимальное среднее расстояние от объекта до объектов в ближайшем другом кластере. Это значение показывает, насколько далеко объект от ближайшего кластера.

Проведен выбор метода прогнозирования с помощью определения значений уже известных свойств разными методами: линейная регрессия, случайный лес, метод «ближайших соседей», метод опорных векторов, дерево принятия решений.

Линейная регрессия показала наилучшую точность прогнозирования по сравнению с другими методами (табл.1).

Таблица 1 - Оценка методов прогнозирования свойств полимерных композиционных материалов

Прогноз	Метод прогноза					
	<i>Линейная регрессия</i>	Случайный лес	Метод "ближайших соседей"	Градиентный бустинг	Метод опорных векторов	Дерево принятия решений
MAE	6,42	16,24	27,9	28,58	42,7	23,85
MSE	210,7	748,02	2160,3	3225,66	7278,6	2103,18
RMSE	14,51	27,34	46,47	56,79	85,31	45,86
R ²	0,998	0,995	0,986	0,9793	0,9534	0,986
MAPE	3,9%	20,6%	18,3%	18,9%	18,9%	26,6%

Доверительный интервал для линейной регрессии рассчитывался с помощью формулы:

$$\bar{x} \pm z_{\alpha/2} \cdot \frac{CKO}{\sqrt{n-1}}, \quad \text{где: } \bar{x} - \text{среднее значение ошибки, } z_{\alpha/2} - \text{значение для выбранного уровня}$$

значимости 99%. Доверительный интервал [-6,22; 15,19] истинная ошибка (разница между реальными значениями и прогнозами) может варьироваться от -6,22 до 15,19.

Разработанная модель позволила сократить число пропущенных значений в наборе данных, что значительно повысило его пригодность для анализа данных и принятия решений.

Модель позволила определять значения свойств полимерных композиционных материалов и сократить число экспериментов на 35%, обеспечивая экономию 80% времени.

Третий раздел посвящен разработке модели автоматизации определения состава полимерных композиционных материалов.

Рассмотрены традиционные методы анализа состава полимеров, включая экспериментальные и теоретические подходы (рис. 4).

Важно отметить, что данные методы требуют значительных временных и финансовых затрат, а также сложны в реализации.

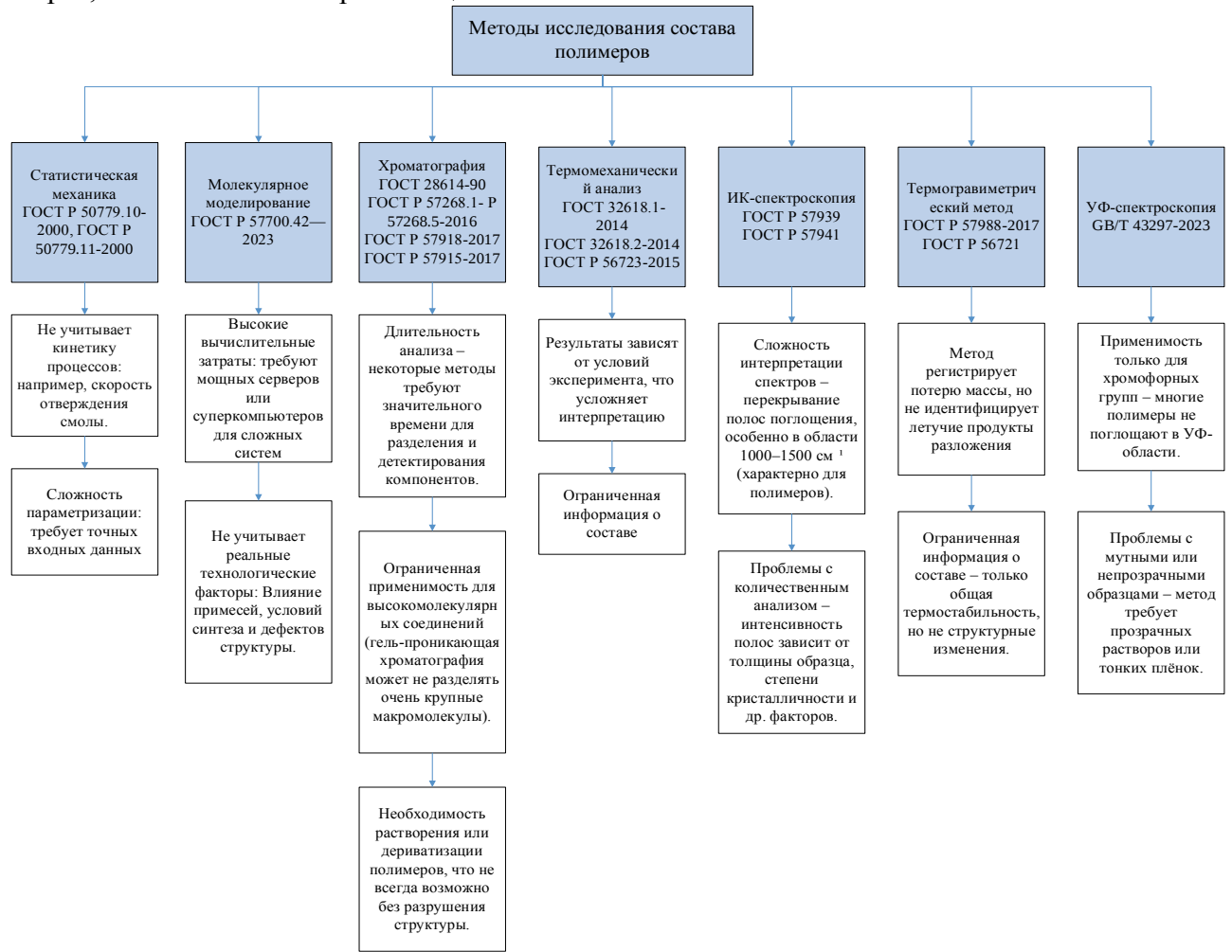


Рисунок 4 – Методы определения состава полимеров

Разработана модель автоматизации определения состава полимерного композиционного материала.

Работа модели автоматизации определения состава полимерных композиционных материалов основана на поиске схожести между заданными пользователем параметрами и данными из кластеризованного набора данных. Для этого используются три метрики расстояния: евклидово, манхэттенское и косинусное.

Модель объединяет кластеризацию данных, поиск схожих материалов в кластере с помощью метрик расстояния, для выявления наилучшей метрики расстояния рассчитывается коэффициент Пирсона, а также сортировку найденных расстояний.

$$\mathbf{A}(\mathbf{a}) = \left\{ \begin{array}{l} C(\mathbf{a}) = \arg \min_s \sum_{i=1}^k \sum_{\mathbf{a} \in S_i} \|\mathbf{a}_i - \mu_i\|^2 \rightarrow \{S_1, S_2, \dots, S_k\}, \\ f_i(\mathbf{B}) = \arg \min_{d \in d_E, d_M, d_C} [1 - \rho(\mathbf{a}, \mathbf{b}_d^*)], \\ \mathbf{B}(\mathbf{a}) = \arg \text{sort } d^*(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \\ \quad \quad \quad \mathbf{b} \in S_{C(\mathbf{a})} \end{array} \right. \quad (3)$$

где: $\mathbf{a}$ - целевой вектор для которого рассчитываются наиболее близкие вектора, $\mathbf{b}$ - вектор, до которого определяется расстояние d_E, d_M, d_C - метрики расстояния.

На вход модели подаются: необходимые свойства для итогового материала или известные свойства связующего и наполнителя (рис.5).

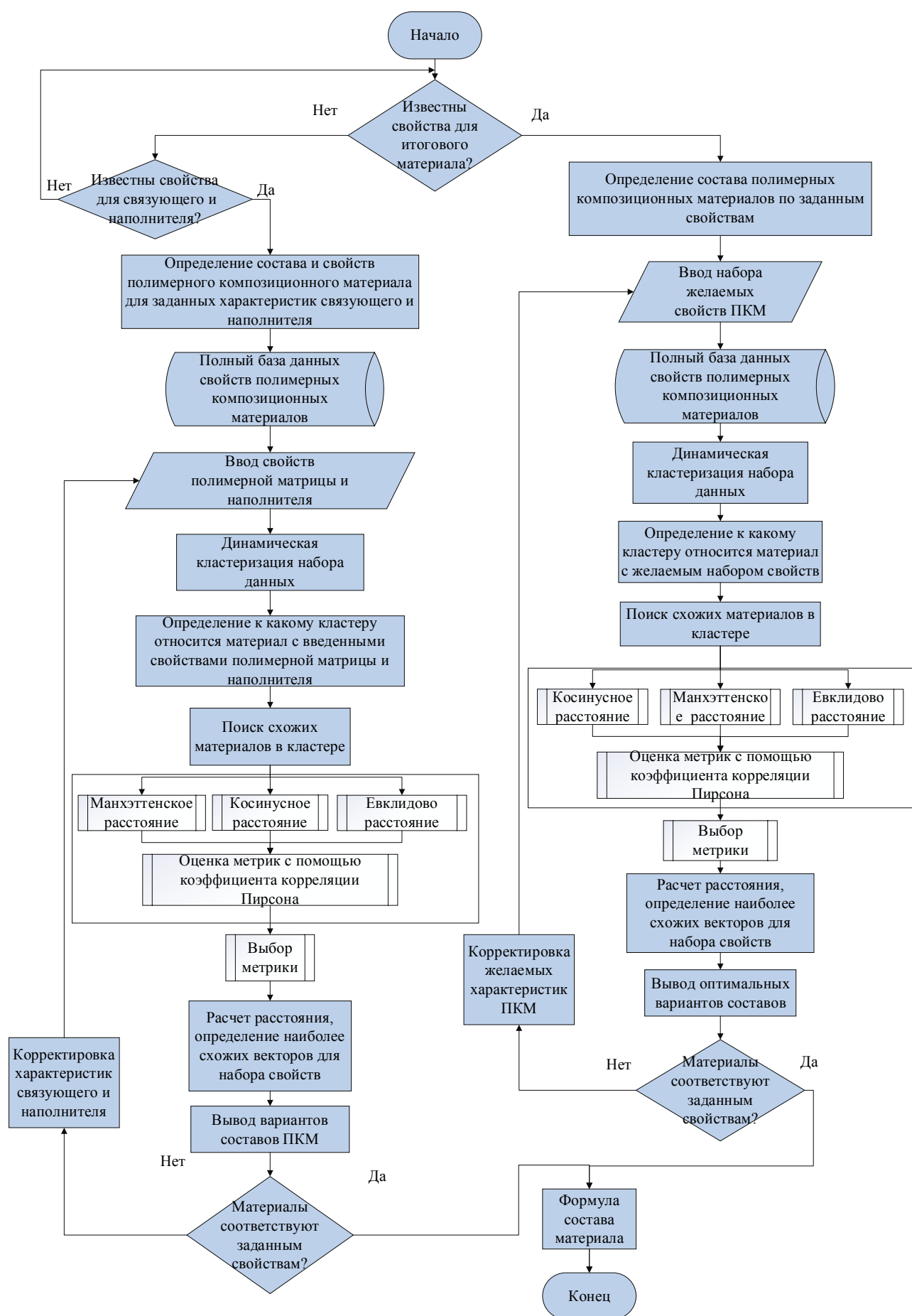


Рисунок 5 – Модель автоматизации определения состава полимерного композиционного материала

Благодаря автоматизированному анализу данных удалось сократить сроки подбора оптимального состава материала с традиционных 2 месяцев до 2 недель и ускорить процесс подбора на 84 – 88%.

Важным достижением модели стало сокращение объема лабораторных исследований на 60%. Модель позволяет прогнозировать свойства материалов без необходимости их физического изготовления и разрушающего тестирования, что не только сокращает расходы, но и уменьшает количество отходов.

Ключевым преимуществом модели является возможность точного расчета концентраций наполнителей для достижения заданных механических и электрических характеристик благодаря чему удается минимизировать количество экспериментальных образцов для испытаний на растяжение, сохраняя при этом достоверность получаемых данных.

Четвертый раздел посвящен разработке методики диагностики состава полимерных композиционных материалов. Основное внимание уделено анализу традиционных методов разрушающего контроля (рис.6), в частности испытаний на растяжение по ГОСТ 11262-2017, которые, несмотря на свою информативность, обладают существенными недостатками.

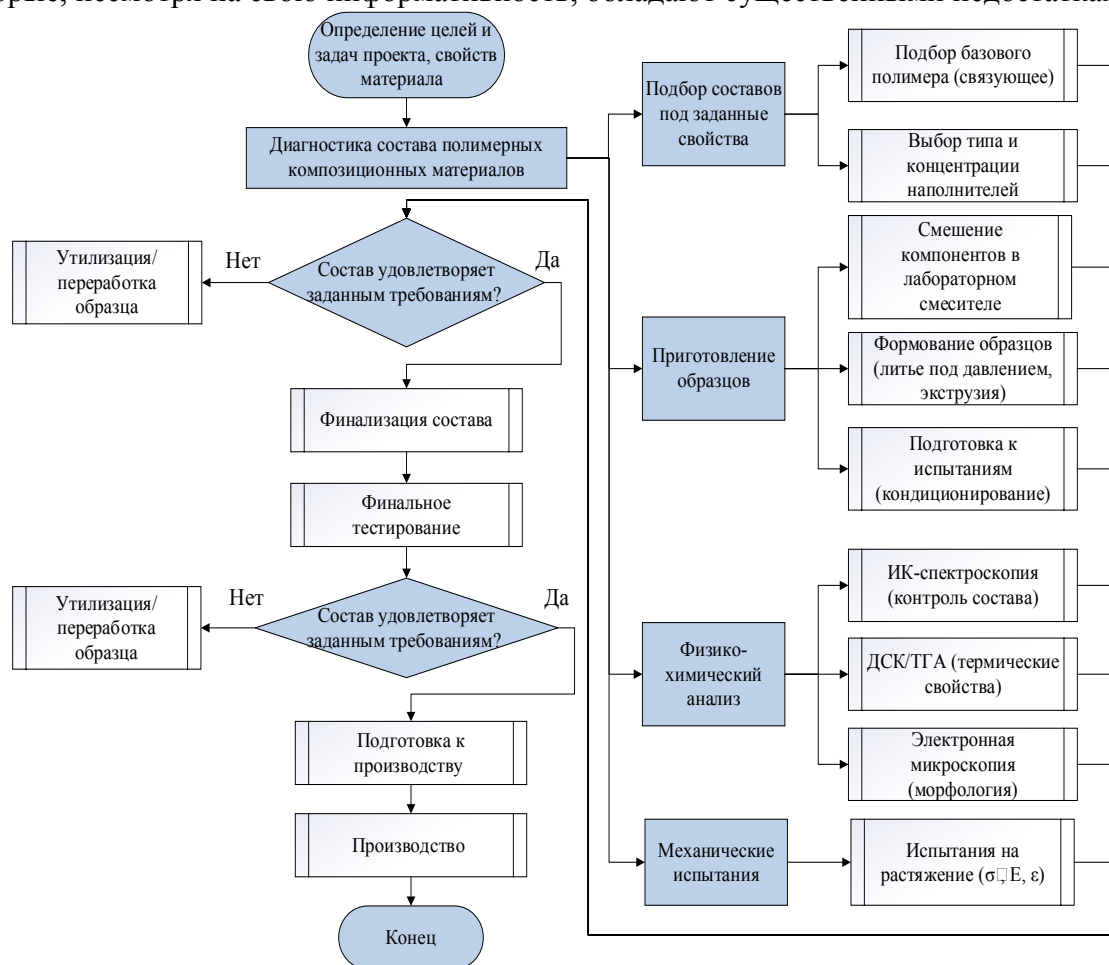


Рисунок 6 – Существующие методы диагностики полимерных композиционных материалов

Составлена матрица полнофакторного эксперимента. Рассмотрена задача создания материала, обладающего диэлектрическими свойствами и высокими механическими свойствами. Исследования проводились для 6 популярных связующих и 4 наполнителей, процентное содержание которых составляло: 0,5; 1; 2; 3%.

По ГОСТ 11262-2017 количество образцов для испытаний на растяжение для одного материала составляет не менее 5 штук.

Для проведения испытаний на растяжение всех комбинаций из 6 матриц и одного наполнителя требуется провести 2160 испытаний 432 материалов. При условии, что у нас есть выбор из четырех наполнителей, число испытаний становится равным 8640 штук.

Рассмотрены ключевые проблемы существующих подходов: необходимость использования большого количества образцов (не менее пяти на один состав), что приводит к значительным финансовым затратам и экологическим рискам (выбросы CO₂ достигают 605 кг при утилизации образцов). Особое внимание уделено анализу факторов, влияющих на стоимость испытаний, включая стоимость сырья, производственные затраты и расходы на утилизацию.

В качестве решения проблем предложена методика определения состава полимерных композиционных материалов (рис. 7).

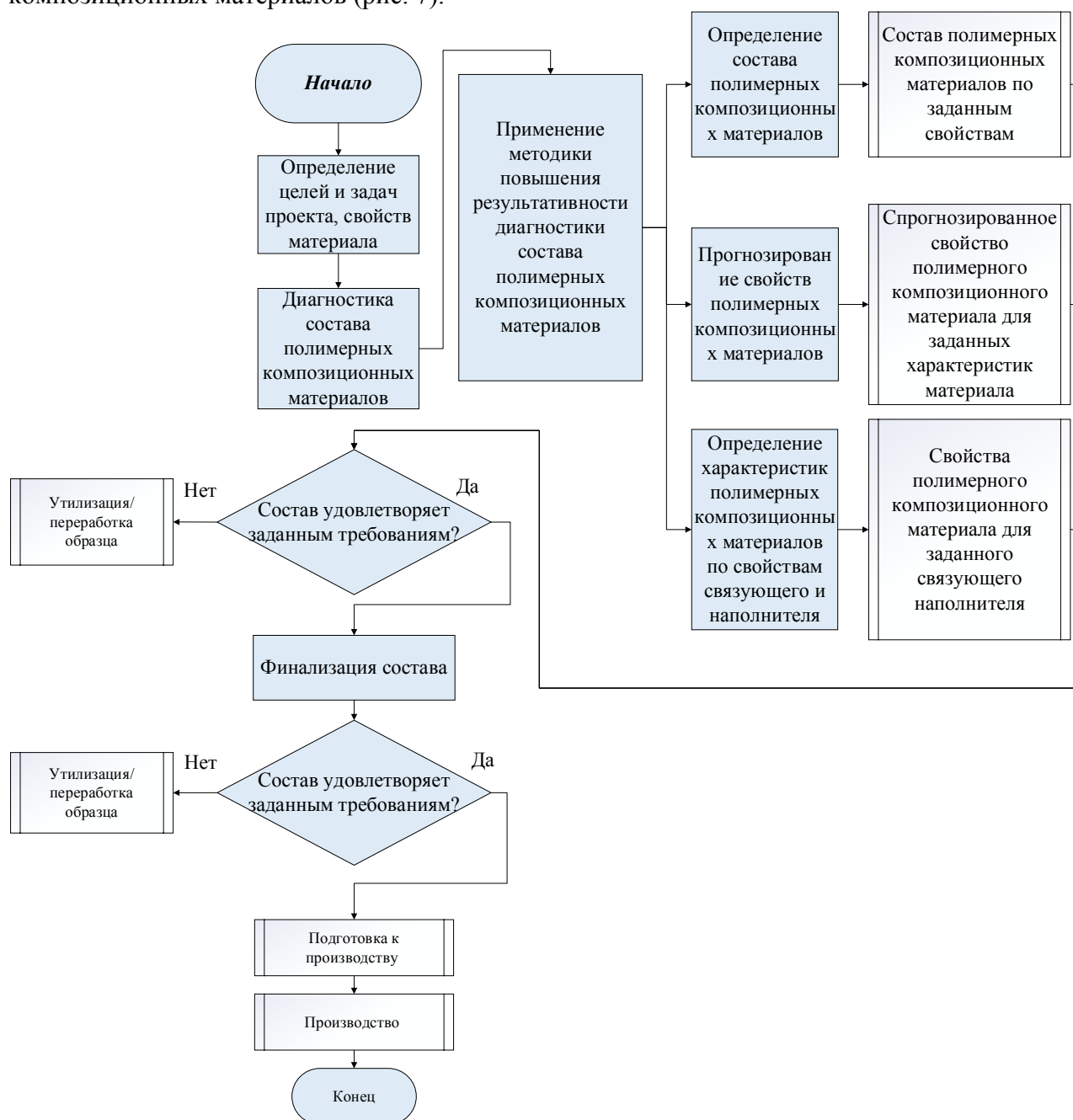


Рисунок 7 – Методика диагностики состава полимерных композиционных материалов

Разработанный алгоритм включает несколько этапов: определение целевых характеристик материала, использование программного интерфейса (рис.8) для подбора оптимальных составов, анализ рекомендаций и последующее тестирование только наиболее перспективных вариантов.



Диагностика полимерных композиционных материалов

Определение состава полимерных композиционных материалов Прогнозирование свойств полимерных композиционных материалов

Определение состава полимерных композиционных материалов



Диагностика полимерных композиционных материалов

Определение состава полимерных композиционных материалов Прогнозирование свойств полимерных композиционных материалов

Прогнозирование свойств полимерных композиционных материалов



Диагностика полимерных композиционных материалов

Определение характеристик полимерных композиционных материалов по свойствам связующего и наполнителя

Определение характеристик полимерных композиционных материалов по свойствам связующего и наполнителя

а)

б)

в)

Рисунок 8 – Интерфейс методики диагностики состава полимерных композиционных материалов: а) Определение состава полимерных композиционных материалов; б) Прогнозирование свойств полимерных композиционных материалов; в) Определение характеристик полимерных композиционных материалов по свойствам связующего и наполнителя

Программа выводит пять составов полимерных композиционных материалов, удовлетворяющих заданным свойствам (рис. 9).

Возможные комбинации составов

	Полимерный композиционный материал	Плотность, г/см ³	Электропроводность, См/м	Удельное
0	70/30 mass.% PES_Al	1.77	150,602.41	
1	80/20 mass.% PES_Steel	2.6	24,213.08	
2	80/20 mass.% PES_Ni	2.88	11,198.21	
3	80/20 mass.% PES_Al	1.64	8,620.69	
4	95/5 mass.% PMMA_MWCNT	1.2	3,455	

Рисунок 9 – Результаты применения методики диагностики состава полимерных композиционных материалов

С применением методики диагностики состава полимерных композиционных материалов общее количество экспериментов составит 450 штук.

Методика позволяет значительно сократить количество образцов, необходимых для испытаний, за счет использования математических методов и моделей, что способствует уменьшению трудоемкости, финансовых затрат, повышению надёжности материалов и обеспечению экологической безопасности окружающей среды.

Внедрение методики диагностики состава полимерных композиционных материалов позволило сократить время на разработку рецептур состава материала на 90-95%. Затраты на проведения испытаний на растяжение снизились на 80-90%.

Пятый раздел посвящен экспериментальному подтверждению эффективности разработанных математических моделей и автоматизированной методики подбора состава полимерных композиционных материалов.

Для применения модели определения свойств полимерных композиционных материалов проведена динамическая кластеризация для группировки материалов по схожим характеристикам, число кластеров $k=3$. С помощью линейной регрессии определены значения искомых свойств полимерных композиционных материалов.

Для подтверждения достоверности результатов свойств полимерных композиционных материалов, полученных с помощью математической модели, проведены испытания материалов на растяжение по ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» устанавливает требования к проведению испытаний полимерных композиционных материалов.

Проведенный сравнительный анализ экспериментальных и спрогнозированных значений механических характеристик полимерных композиционных материалов (предела прочности при растяжении, удлинения и модуля упругости) демонстрирует высокую точность разработанной модели. Наблюдается хорошая корреляция между фактическими и

спрогнозированными значениями для большинства образцов, что подтверждается коэффициентом детерминации $R^2 > 0,95$ для всех трех параметров (табл. 2).

Таблица 2 – Оценка механических свойств, полученных с помощью математической модели

Параметр	Предел прочности при растяжении (МПа)	Удлинение (%)	Модуль упругости (МПа)
MAE	0,082	0,023	0,147
MSE	0,012	0,0009	0,043
RMSE	0,110	0,030	0,207
MAPE (%)	12,3	8,7	5,2
R^2	0,963	0,951	0,982

Полученные результаты подтверждают эффективность применения математического моделирования для прогнозирования механических свойств полимерных композиционных материалов и открывают перспективы для дальнейшей оптимизации исследовательских процессов в материаловедении.

Проведена апробация модели автоматизации определения состава полимерных композиционных материалов.

Для проведения апробации модели автоматизации определения состава полимерных композиционных материалов необходимо обозначить свойства, которыми должен обладать итоговый полимерный композиционный материал: материал должен быть легким, плотность 1-1,5 г/см³, материал должен быть диэлектриком, пределом прочности при разрыве более 200 МПа обладать удлинением при разрыве более 10 %, модуль Юнга более 1,5 ГПа.

С помощью модели определим 5 материалов, с подходящими нам свойствами (табл.3).

Таблица 3 – Материалы, определенные с помощью модели автоматизации определения состава полимерных композиционных материалов

Полимерный композиционный материал	Плотность, г/см ³	Удельное поверхностное сопротивление, Ом м	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при разрыве	Деформация (удлинение), %	Модуль упругости Юнга, МПа
PC/MWCNT 99/1 масс. %	1,2	1 250 000 000	58	314	20	1570
PC/MWCNT 95/5 масс. %	1,2	100 000 000	61	231	15	1540
PC/MWCNT 98/2 масс. %	1,2	33 333 333,33	62	331,8	21	1580
PC/MWCNT 99/1 масс. %	1,21	2000	61	71	4,96	1431
PC/MWCNT 99,8/0,2 масс. %	1,2	0,33	60	189,8	13	1460

Из представленных моделью вариантов нам подходят первые три материала: PC_MWCNT mass.% 99/1, PC_MWCNT mass.% 95/5, PC_MWCNT mass.% 98/2.

Для подтверждения достоверности результатов проведем испытания на растяжение и испытания на определение удельного объемного сопротивления материалов PC_MWCNT mass.% 99/1, PC_MWCNT mass.% 95/5, PC_MWCNT mass.% 98/2.

В исследовании использовался поликарбонат Бисфенол А поликарбонат (BPA-PC) с добавлением многостенных углеродных нанотрубок MWCNT-5.

Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 11262-2017. Было изготовлено по 5 образцов на один материал, изготовленных прессованием. Образцы кондиционировались в течение суток при температуре 24°C и относительной влажности 53%. Испытания для определения электрических сопротивлений проводились в соответствии ГОСТ Р 50499-93 (МЭК 93-80).

Значения, определенные с помощью модели автоматизации определения состава полимерных композиционных материалов демонстрируют высокую точность по сравнению с экспериментальными данными. Наибольшие отклонения не превышают 1,5%, что свидетельствует о хорошей предсказательной способности модели. Наименьшие расхождения наблюдаются для удельного сопротивления (менее 1% для всех составов), что особенно важно для электротехнических применений. Механические свойства также предсказаны с высокой точностью, что подтверждает надежность прогноза.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе изложено новое научно обоснованное техническое решение совершенствования диагностики состава полимерных композиционных материалов с заданными механическими свойствами при сохранении электрических характеристик. Разработанные модели и методики позволяют существенно сократить трудоемкость и финансовые затраты на проведение испытаний, повысить надежность изделий и обеспечить экологическую безопасность окружающей среды.

1. Разработанная математическая модель определения механических и электрических свойств полимерных композиционных материалов продемонстрировала высокую эффективность при работе с данными полимерных композитов, позволила определять значения свойств полимерных композиционных материалов и сократить число экспериментов на 35%, обеспечивая экономию 80% времени.

2. Внедрение информационной модели определения состава полимерного композиционного материала позволило сократить сроки подбора оптимального состава полимерного композиционного материала с 2 месяцев до 2 недель. Достигнуто ускорение процесса определения состава на 84-88%. Модель позволяет сократить объем лабораторных исследований на 60-62%.

3. Внедрение методики диагностики состава полимерных композиционных материалов позволило сократить время на разработку рецептур состава материала на 90-95%. Затраты на проведения испытаний на растяжение снизились на 80-90%.

Полученные результаты соответствуют пунктам 1, 4 и 7 паспорта специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» и вносят существенный вклад в развитие цифрового материаловедения. Разработанные подходы открывают новые возможности для ускоренного проектирования полимерных композиционных материалов с заданными свойствами, что имеет важное значение для различных отраслей промышленности, включая аэрокосмическую, электротехническую и автомобильную индустрию.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Гущина Е.А. Методика диагностики состава полимерных композиционных материалов / А.Р. Бестугин, Е.А. Гущина, Е.А. Фролова // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 5. С. 166–172.

2. Гущина Е.А. Исследование возможности применения кластерного анализа для прогнозирования свойств полимерных композитных материалов /Е.А. Гущина // Контроль. Диагностика 2025. №4. С. 60 - 66.

3. Гущина Е.А. Проектирование базы данных полимерных композитных материалов/Е.А. Гущина// Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2024. Т. 80. № 2. С. 46-49.

4. Гущина Е.А. Эффективный способ пополнения базы данных / Е.А. Гущина, Л.А. Решетов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2024. Т. 80. № 1. С. 92-96.
5. Гущина Е.А. Применение стохастического градиентного алгоритма при формировании базы данных композитных материалов /Е.А. Гущина, Л.А. Решетов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2024. Т. 80. № 1. С. 87-91.
6. Гущина Е.А. Влияние содержания наполнителя на прочностные характеристики в композиционных материалах/ Е.А. Гущина // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2023. Т. 79. № 4. С. 54-57.
7. Гущина Е.А. Моделирование показателей прочности композитных материалов. /Е.А. Гущина// Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2023. Т. 79. № 2. С. 41-43.
8. Гущина Е.А. Метод определения прочности на разрыв композиционных материалов. / Е.А. Гущина // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2023. Т. 79. № 2. С. 37-40.
9. Гущина Е.А. Метод определения показателей прочности и упругости полимерных композиционных материалов / Е.А. Гущина, А.С. Степашкина //Альманах современной метрологии. 2022. № 4 (32). С. 68-74.

Статьи в других изданиях и материалы конференций

10. Гущина Е.А. Использование алгоритма k-means в рекомендательных системах полимерных композиционных материалов/ Е.А. Гущина, Е.А. Фролова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 488-490.
11. Гущина Е.А. Математические модели в разработке полимерных композитов. / Е.А. Гущина // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 490-492.
12. Прогнозирование и исследование механических и электрических свойств полимерных композиционных материалов / Е.А. Гущина // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей VII Международного форума, Санкт-Петербург, 04 марта 2025 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2025. С. 492-494.
13. Гущина Е.А. Метод контроля и диагностики состава полимерных композиционных материалов на основе алгоритмов кластеризации / Е.А. Гущина, Е.А. Фролова // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3. №6. С. 57-60.
14. Гущина Е.А. Стохастический градиентный алгоритм в базе данных полимерных композитов / Е.А. Гущина, Л.А. Решетов// Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. С. 30-33.
15. Гущина Е.А. Проектирование базы данных полимерных композитных материалов /Гущина Е.А.// Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 06 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024- С. 10-12.
16. Гущина Е.А. К вопросу о наиболее эффективном пополнении базы данных / Е.А. Гущина, Л.А. Решетов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей VI Международного форума, Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. С. 421-422.
17. Гущина Е.А. Зависимость прочностных характеристик композита от содержания наполнителя» /Е.А. Гущина // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей VI Международного форума, Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2024. С. 81-82.

18. Гущина Е.А. Метод определения механических свойств полимерных композиционных материалов /Е.А. Гущина, А.С. Степашкина, О.В. Чупринова // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сб. статей V Международного форума, Санкт-Петербург, 02 марта 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 46-48.

19. Гущина Е.А. «Моделирование показателей прочности композитных материалов» / Е.А. Гущина / Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сб. тезисов докладов III Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2023. С. 110-112.

20. Гущина Е.А. Метод определения прочностных характеристик композитных материалов», /Е.А. Гущина, А.С. Степашкина // Инновационное приборостроение. 2022. Т. 1. №2. С. 91-96.

21. Гущина Е.А. Методы моделирования механических процессов в полимерных материалах. / Е.А. Гущина, А.С. Степашкина, О.В. Чупринова // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. Сб. тезисов докладов Третьей Всероссийской научной конференции. Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2022 года. Санкт-Петербург: ГУАП, 2022. С- 234-327.

Авторские свидетельства, патенты, информационные карты, алгоритмы

22. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа для кластерного анализа и прогнозирования свойств полимерных композитных материалов» / Е.А. Гущина / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025618094, 04.04.2025. Заявка № 2025616850 от 01.04.2025.

23. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа для прогнозирования способа получения состава и свойств новых композиционных материалов»/ Е.А. Гущина, И.М. Рубин, А.Д. Якушев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024667153, 22.07.2024. Заявка № 2024666546 от 22.07.2024.

24. Свидетельство о гос. регистрации базы данных: «База данных композитных материалов с электропроводящими наполнителями»/Е.А. Гущина, Л.А. Решетов, И.М. Рубин, А.Д. Якушев //Свидетельство о регистрации базы данных RU 2024622324, 28.05.2024. Заявка № 2024621987 от 17.05.2024.