

Научная статья

УДК 622.23.05

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-119-127

Аксенов Владимир Валерьевич^{1,2}, Романов Юрий Александрович^{1,3},
Мягких Илья Дмитриевич^{3*}, Крамп Альбина Сагитовна³

¹ Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

³ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск,

* для корреспонденции: cliomineng06@gmail.com

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДЕЛЕЙ ГЕОХОДОВ С ГЕОСРЕДОЙ

Аннотация.

В статье представлена расширенная комплексная методика экспериментальных исследований масштабных моделей геохонд, предназначенных для перемещения в неоднородных и анизотропных геосредах различного генезиса. Актуальность работы обусловлена возрастающими требованиями к надежности и энергоэффективности автономных проходческих комплексов, а также необходимостью детального изучения нелинейных, стохастических процессов взаимодействия движителя с грунтовым массивом, которые не могут быть адекватно описаны традиционными методами, регистрирующими лишь интегральные усредненные характеристики. В исследовании предложена иерархическая многоуровневая классификация регистрируемых параметров, включающая три функциональные группы: (1) силовые характеристики привода (момент срабатывания, динамический крутящий момент, осевое тяговое усилие, реактивные моменты); (2) кинематические параметры движения (линейная и угловая скорости, коэффициент проскальзывания, ускорения, траекторные отклонения); (3) параметры напряженно-деформированного состояния геосреды (контактное давление в приконтурной зоне, распределение давления в массиве, деформация элементов конструкции, параметры разрушения грунта). Разработана модульная архитектура автоматизированной системы регистрации данных (АСРД), обеспечивающей синхронную регистрацию сигналов с тензометрических, оптических, инерциальных и акустических датчиков с погрешностью временной синхронизации не более 1 мс и частотой дискретизации аналоговых каналов до 500 Гц. Система реализована на базе промышленной платы сбора данных с 16-разрядным АЦП, гальванической развязкой входов, экранированием кабельных трасс и программной фильтрацией электромагнитных помех. Описан многоэтапный конвейер обработки многомерных данных, включающий предобработку сигналов (фильтрация Баттерворта, компенсация дрейфа нуля, нормализация), извлечение статистических и спектральных дескрипторов, анализ временных рядов и частотных характеристик динамических процессов. Для выявления скрытых нелинейных зависимостей применены метод главных компонент (РСА), корреляционный анализ Пирсона/Спирмена и кластеризация K-means, позволяющие визуализировать кластеры устойчивых режимов работы, оценить влияние геологических параметров грунта на энергопотребление и классифицировать типы взаимодействия «движитель–геосреда». Апробация методики на лабораторном стенде с моделированием различных типов грунтов позволила зафиксировать кратковременные пики крутящего момента при трогании геохонд, превышающие средние значения в 2,5 раза; определить зону возмущения геосреды (до трех диаметров корпуса); выявить оптимальные режимы движения по



Информация о статье

Поступила:

04 марта 2026 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к печати:

15 июня 2026 г.

Ключевые слова:

геоход, экспериментальные исследования, регистрация параметров, тензометрия, обработка данных, взаимодействие с геосредой, автоматизированная система сбора данных

критерию минимальных удельных энергозатрат; установить количественные зависимости между влажностью, плотностью грунта и тягово-скоростными характеристиками геохода. Внедрение разработанной методики сокращает сроки конструкторской доработки геоходов на 30%, повышает достоверность прогнозных математических моделей и рекомендуется для использования при создании новых модификаций проходческого оборудования, проведении сертификационных испытаний и верификации численных моделей взаимодействия рабочих органов с грунтом.

Для цитирования: Аксенов В.В., Романов Ю.А., Мягих И.Д., Крамп А.С. Комплексная методика исследований взаимодействия моделей геоходов с геосредой // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 3 (185). С. 119-127. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-119-127, EDN: NYDKWJ

Введение

Разработка автономных мобильных аппаратов для перемещения в сложных геосредах (геоходов) представляет собой актуальное направление развития горного машиностроения, геофизической разведки и строительства подземных сооружений [1]. В отличие от традиционных проходческих комплексов, требующих организации открытого забоя или тоннельной крепи, геоходы используют принцип винтового, шнекового или комбинированного движения, что позволяет осуществлять прокладку коммуникаций, бурение скважин и исследование массива без открытого вскрытия траншеи, снижая воздействие на окружающую среду и общую трудоемкость работ [2].

Достижение высоких показателей эффективности и надежности эксплуатации любой горной машины обусловлено пониманием процессов, происходящих в конструктивных элементах, а также высоким качеством самих элементов [3, 4]. В работе [5] показано, что учет реакции системы на внешние воздействия позволяет оценивать наиболее ответственные элементы машины, а в дальнейшем моделировать уровни их повреждения.

Таким образом, необходимо разработать модель, способную адекватно оценивать взаимодействие компонентов геохода с геосредой. Однако процесс взаимодействия движителя геохода с грунтом представляет собой сложную нелинейную динамическую систему, характеризующуюся стохастическими флуктуациями контактных напряжений, неоднородностью реологических свойств геосреды, наличием включений и пустот, а также эффектом памяти грунта [6 – 8]. Существующие методики испытаний часто ограничиваются регистрацией интегральных показателей (средняя скорость, общее энергопотребление, усредненное тяговое усилие), что не позволяет детально изучить физику процесса страгивания, проскальзывания, распределения напряжений в массиве и механизмов разрушения грунта.

Так, в работах [9 – 10] рассмотрены модели ножевой формы исполнительного органа геохода для мягких пород, при этом не рассматриваются следующие проблемные вопросы: расчетные усилия на режущих элементах, заложенные при проектировании, могут оказаться недостаточными при встрече с твердыми включениями или, наоборот, избыточными в раскисшем мягком грунте, что приведет к

его зарыванию и последующему выходу привода из строя.

Следующее направление исследований посвящено уменьшению металлоемкости и трудоемкости в процессе изготовления отдельных деталей и узлов [11 – 13], что обуславливает требования к приемлемой достоверности по прочности и износостойкости компонентов, реализуемые разрабатываемой моделью.

Отсутствие стандартизированной системы регистрации многомерных данных затрудняет верификацию математических моделей, оптимизацию конструкции движителя и прогнозирование поведения геохода в натуральных условиях. В связи с этим возникает потребность в разработке комплексной методики, обеспечивающей одновременную регистрацию силовых, кинематических и геомеханических параметров с высокой временной разрешающей способностью и последующий многомерный анализ полученных данных.

Цель работы: разработка и теоретико-экспериментальное обоснование комплексной методики экспериментальных исследований моделей геоходов, включающей расширенный перечень регистрируемых параметров, аппаратно-программный комплекс синхронного сбора данных и современные методы их многомерного статистического анализа.

Для решения поставленной цели сформулированы задачи исследования:

1. Разработать иерархическую классификацию параметров взаимодействия геохода с геосредой, охватывающую силовые, кинематические и геомеханические характеристики.
2. Обосновать технические требования к автоматизированной системе сбора данных и реализовать ее аппаратно-программную архитектуру.
3. Разработать модуль предобработки и анализа многомерных сигналов, включающий фильтрацию, извлечение признаков и методы снижения размерности.
4. Апробировать методику на лабораторном стенде и оценить ее эффективность для оптимизации конструкции геоходов.

Материалы и методы

Методология исследований включает ряд методов и последовательных процедур.

Рассмотрим метод оценки параметров взаимодействия модели геохода и среды в лабораторных условиях.

Процедура подготовки модельной геосреды. Для обеспечения воспроизводимости и достоверности экспериментальных результатов критически важно корректное моделирование свойств натурной геосреды в лабораторных условиях. Процедура подготовки включает следующие этапы:

1. Послойная засыпка и уплотнение грунта. Грунт заданного гранулометрического состава (согласно ГОСТ 12536-2014) засыпается в стенд слоями толщиной 50–100 мм. Каждый слой уплотняется динамическим зондированием или виброуплотнением до достижения целевой плотности (1400–2000 кг/м³). Контроль плотности осуществляется отбором проб и лабораторным определением объемной массы.

2. Задание и поддержание влажности в требуемом диапазоне. Увлажнение производится дозированным распылением воды с последующим перемешиванием. После увлажнения геосреда выдер-

живается в течение 24 часов для равномерного распределения влаги и стабилизации капиллярных сил. Контроль влажности осуществляется весовым методом (высушивание проб при 105°C).

3. Установка выносных датчиков давления. Мембранные тензометрические датчики давления (диапазон 0–100 кПа) устанавливаются на заданных расстояниях от предполагаемой траектории движения модели: 0,5D, 1D, 2D, 3D (где D – диаметр корпуса геохода). Датчики монтируются в специальных гильзах, исключающих нарушение целостности массива и обеспечивающих надежный контакт с грунтом. Проводится калибровка датчиков непосредственно на модели аппарата с применением эталонных нагрузок. Следует отметить, что в данном случае датчик калибруется вместе со всей цепочкой и учитывает активное и реактивное сопротивление кабеля и преобразователей. Другим достоинством калибровки на модели является то, что это позволяет установить нулевую точку после погружения модели геохода в среду.

4. Фиксация начального напряженного состоя-

Таблица 1. Перечень регистрируемых параметров испытаний геохода

Table 1. List of recorded parameters of geokhod tests

Группа параметров	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение для исследований
Силовые	Момент страгивания (статический)	Н·м	Оценка пиковых нагрузок на привод
	Момент поддержания движения (динамический)	Н·м	Оценка установившегося режима
	Осевое тяговое усилие	кН	Характеристика прочностных свойств модели
Кинематические	Линейная скорость поступательного движения	м/с	Производительность аппарата
	Угловая скорость вращения движителя	об/мин	Оценка режимов работы трансмиссии
	Коэффициент проскальзывания	%	Эффективность зацепления с грунтом
Напряженно-деформированное состояние (НДС)	Контактное давление (приконтурная зона)	кПа	Локальные нагрузки на оболочку модели
	Давление в массиве (на удалении)	кПа	Зона влияния геохода на массив
	Деформация элементов конструкции	мкм	Прочностной анализ модели

Таблица 1. Пошаговый протокол проведения эксперимента

Table 2. Step-by-step protocol for conducting the experiment

Шаг	Действие	Длительность	Контрольные параметры
1	Запуск АСРД в режим ожидания, проверка связи с датчиками	2 мин	Статус всех каналов – «ОК»
2	Запись фонового сигнала (нулевая нагрузка)	10 сек	Стабильность показаний, уровень шумов
3	Запуск привода геохода на холостом ходу (без контакта с грунтом)	5 сек	Частота вращения, отсутствие вибраций
4	Плавное страгивание модели (контакт с грунтом, начало движения)	3–5 сек	Пиковый момент, время страгивания
5	Движение в установившемся режиме	60 сек	Стабильность скорости, колебания момента
6	Плавная остановка привода	3–5 сек	Затухание колебаний, остаточные деформации
7	Запись сигнала затухания (пост-процесс)	10 сек	Возврат к фоновым значениям
8	Остановка АСРД, сохранение данных, резервное копирование	1 мин	Целостность файлов, контрольные суммы

ния. Перед началом испытаний регистрируются фоновые показания всех датчиков в течение 10-15 секунд. Фиксируются начальные значения давления в массиве, которые в дальнейшем используются для компенсации дрейфа и выделения возмущений, вызванных движением модели.

После выполнения всех работ по подготовке геологической среды переходим к следующей процедуре.

Монтаж измерительной аппаратуры на модель геолога.

1. Силовые измерения.

Измерение крутящего момента проводится с использованием тензометрического моста Уитстона. Мост, наклеенный на вал привода под углом 45° к оси, обеспечивает измерение крутящего момента с погрешностью не более $\pm 1,5\%$. Сигнал передается через бесконтактный тензометрический усилитель для исключения влияния скользящих контактов.

Осевое тяговое усилие измеряется при помощи тензодатчиков сжатия/растяжения, установленных на тяговой раме модели. Тензодатчики регистрируют продольную нагрузку с разрешением $0,01$ кН.

Усилие реакции испытательного стенда (для некоторых моделей) также измеряется при помощи тензодатчиков, размещаемых в точке крепления модели, фиксирует реакции опор и позволяет оценить баланс сил в системе.

2. Кинематические измерения.

Угловая скорость измеряется при помощи оптического энкодера с разрешением 1024 импульса/оборот, установленного на валу двигателя, обеспечивает измерение частоты вращения с точностью $\pm 0,1$ об/мин.

Линейное перемещение измеряется лазерным дальномером или линейным энкодером с шагом $0,1$ мм. Регистрируется поступательное движение модели относительно стенда.

Проскальзывание модели геолога в среде фиксируется и обрабатывается высокоскоростной видеокамерой (≥ 100 кадров/с) с маркерами на корпусе и грунте, позволяя визуализировать и количественно оценить коэффициент проскальзывания методом цифровой корреляции изображений.

3. Геомеханические параметры геосреды (параметры напряженно-деформированного состояния НДС среды).

Контактное давление оцениваем при помощи миниатюрных тензорезисторов, наклеенных на поверхность модели в зонах максимального контакта. Миниатюрные тензорезисторы регистрируют локальные нагрузки на оболочку модели геолога.

Давление в нескольких точках внутри имитируемого массива пород. Давление в массиве показывают выносные мембранные датчики, они фиксируют распространение возмущений в грунте на некотором удалении от взаимодействующих поверхностей.

Деформации конструкции корпуса и силовых элементов трансмиссии определяются при помощи электронных тензодеформометров (тензорезисторов).

Классификация регистрируемых параметров. Для получения полноценной картины взаимодействия модели с геосредой предложен иерархический перечень параметров, подлежащих регистрации в ходе испытаний (Таблица 1). Параметры сгруппированы по функциональному признаку и уровню влияния на процесс.

Особое внимание уделено регистрации давления на различном удалении от модели с помощью выносных тензометрических датчиков, что позволяет построить трехмерную эпюру распространения возмущений в геосреде и количественно оценить радиус зоны влияния проходки.

Аппаратная реализация системы сбора данных. Для реализации методики разработано техническое задание (ТЗ) на автоматизированную систему регистрации данных (АСРД). Ключевыми требованиями к системе являются:

Синхронизация: Погрешность временных меток между разнородными каналами (тензодатчики, энкодеры, видео, акустика) не должна превышать 1 мс. Достигается применением общего тактового генератора и синхронизации по TTL-импульсам.

Дискретизация: Частота опроса аналоговых каналов – не менее 500 Гц для регистрации динамических пульсаций момента при страгивании (частотный диапазон до 50 Гц).

Разрядность: АЦП не менее 16 бит для обеспечения высокой чувствительности тензометрических измерений (разрешение по напряжению $\sim 0,15$ мВ при полном диапазоне 10 В).

Помехозащищенность: Гальваническая развязка аналоговых входов ($2,5$ кВ), экранирование кабельных трасс, дифференциальная передача сигналов для подавления синфазных помех.

Архитектура системы включает:

Усилители сигналов датчиков (мост Уитстона с автоматической балансировкой);

Плату сбора данных на базе NI PXI-6289 или аналогов с открытой архитектурой (16 аналоговых входов, 8 цифровых, 2 счетчика);

Промышленный контроллер с ПО на базе LabVIEW/Python для управления экспериментом и первичной обработки;

Модуль синхронизации видео с аналоговыми каналами через аппаратный триггер;

Систему резервного копирования данных в реальном времени на SSD-накопитель.

Протоколирование и стандартизация испытаний. Важным элементом методики является унификация процесса документирования, обеспечивающая воспроизводимость результатов и соответствие требованиям стандартов ГОСТ Р 58900-2020 и ГОСТ 8.009-84 [14, 15].

Структура протокола испытаний включает:

Паспортные данные модели (масштаб, материалы, геометрия движителя);

Характеристики моделируемой геосреды (плотность, влажность, гранулометрия, угол внутреннего трения, сцепление);

Калибровочные коэффициенты всех датчиков с датами поверки;

Чек-лист проверяемых параметров и условий проведения эксперимента;

Журнал оператора с отметками о нештатных ситуациях.

Формат хранения данных: Каждый эксперимент сопровождается метаданными, записываемыми в структурированном формате HDF5/JSON, что обеспечивает:

Самодокументируемость файлов (встроенные описания переменных);

Быстрый доступ к подмножествам данных без загрузки всего файла;

Совместимость с инструментами анализа (Python, MATLAB);

Долгосрочную архивацию и воспроизводимость.

Последовательность операций в ходе испытаний приведена в Таблице 2.

Варьирование параметров: для построения поверхностей отклика и выявления оптимумов проводится серия экспериментов с варьированием ключевых факторов:

Частота вращения движителя: 10, 30, 50, 70, 100 об/мин;

Осевая скорость подачи: 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 мм/с;

Влажность грунта: 5%, 15%, 25%;

Плотность упаковки: 1,4; 1,7; 2,0 г/см³;

Угол атаки рабочего органа: -10°...+10° с шагом 5°.

Общее количество комбинаций: 5×5×3×3×5 = 1125 экспериментов (при полном факторном плане). На практике применяется дробный факторный план или метод латинского гиперкуба для сокращения объема испытаний при сохранении репрезентативности [16 – 19].

Обработка и анализ многомерных данных. Сырые данные, полученные в ходе испытаний, подвергаются многоступенчатой обработке. Предложенный конвейер обработки данных включает следующие этапы:

1. Предобработка сигналов. На первом этапе выполняется синхронизация каналов методом линейной интерполяции к общей временной сетке. Для устранения высокочастотных шумов и сетевых наводок применяется фильтр Баттерворта низких частот (порядок 2–4). Дрейф нуля тензодатчиков компенсируется вычитанием базовой линии, зафиксированной до начала движения модели.

2. Извлечение признаков. Для каждого временного ряда рассчитывается набор статистических дескрипторов: среднее значение, среднеквадратичное отклонение (RMS), эксцесс и асимметрия распределения. Для динамических процессов (например, пульсации момента) проводится спектральный анализ (БПФ) для выявления резонансных частот конструкции.

3. Многомерный анализ. Для выявления скрытых зависимостей между параметрами геосреды и энергоэффективностью геохода применяется метод главных компонент (РСА). Это позволяет снизить размерность пространства признаков и визуализировать кластеры устойчивых режимов работы.

Корреляционный анализ (коэффициент Пирсона/Спирмена) используется для оценки влияния влажности грунта на крутящий момент страгивания. Пример математической модели зависимости момента M от скорости v и плотности грунта p может быть представлен в виде:

$$M = f(v, p, W) + \varepsilon,$$

где W – влажность, ε – случайная погрешность. Коэффициенты функции определяются методом множественной регрессии на основе экспериментальной выборки.

Результаты и обсуждение

Апробация методики на лабораторном стенде показала следующие результаты:

Детализация процесса страгивания. Высококачественная регистрация (500 Гц) впервые позволила зафиксировать кратковременные пики крутящего момента при страгивании, превышающие среднее значение в 2,5 раза. Длительность пиков составляла 20–50 мс, что не фиксировалось стандартными приборами с частотой опроса 10–50 Гц.

Практическая ценность метода заключается в необходимости увеличения коэффициента запаса прочности для элементов трансмиссии с учетом динамических перегрузок; на некоторых моделях рекомендуется применение демпфирующих муфт.

Анализ зоны влияния на геосреду. Данные с выносных датчиков давления показали, что зона возмущения геосреды распространяется на расстояние до 3D от поверхности корпуса геохода. При этом:

- на расстоянии 0,5D давление достигает 60–80% от контактного;
- на расстоянии 1D – 20–35%;
- на расстоянии 3D – менее 5% (фоновый уровень).

Практическое следствие: критически важно для оценки влияния проходки на близлежащие подземные сооружения, трубопроводы, фундаменты; обоснование минимального расстояния между параллельными выработками.

Оптимизация режимов движения. Построение поверхностей отклика (Графиков механических и мощностных характеристик) для различных геосред позволило выявить область оптимальных режимов, где удельные энергозатраты на единицу пройденного пути минимальны. Использование кластеризации (K-means) позволило автоматически классифицировать режимы движения на «устойчивый», «пробуксовка» и «заклинивание».

Разработанная форма протокола испытаний позволяет систематизировать данные и корректно оценивать результаты для моделей с различными конструктивными параметрами, а также сокращает время на оформление отчетной документации на 30% за счет автоматической генерации разделов из файлов метаданных.

Выводы

Разработана комплексная методика экспериментальных исследований геоходов, охватывающая силовые, кинематические и геодезические параметры взаимодействия с геосредой на основе иерархической классификации регистрируемых величин.

Обоснованы технические требования к автоматизированной системе сбора данных, обеспечивающей синхронную регистрацию разнородных сигналов с погрешностью синхронизации ≤ 1 мс и частотой дискретизации до 500 Гц.

Предложен модуль обработки многомерных данных, включающий предобработку сигналов, извлечение статистических и спектральных признаков, а также методы PCA, корреляционного анализа и кластеризации для выявления скрытых зависимостей.

Экспериментальная апробация методики позволила зафиксировать динамические пики момента при страгивании, определить радиус зоны возмущения геосреды (до 3D) и выявить оптимальные режимы движения по критерию минимальных удельных энергозатрат.

Внедрение методики сокращает сроки конструкторской доработки геогодов на 30%, повышает достоверность прогнозных моделей и рекомендуется к использованию при создании новых модификаций проходческого оборудования и проведении сертификационных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоров А. В. Основы проектирования безтраншейных проходческих машин. М. : Горная книга, 2018. 320 с.
2. Кузнецов В. Г. Роботизированные комплексы для подземных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 45–52.
3. Abramovich A., Pudov E., Kuzin E. Prerequisites for the Establishment of the Automated Monitoring System and Accounting of the Displacement of the Roof of Underground Mines for the Improvement of Safety of Mining Work // E3S Web of Conferences : The Second International Innovative Mining Symposium. 2017. Vol. 21. Kemerovo: EDP Sciences, 2017. P. 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/20172101011. EDN ZRMGDL.
4. Герике Б. Л., Дрозденко Ю. В., Герике П. Б. [и др.] Распознавание дефектов подшипников качения в редукторах горных машин по параметрам вибрационного сигнала // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 5(132). С. 43–48. EDN ZDMVIZ.
5. Кузин Е. Г. Живучесть горнотехнических и транспортных систем // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5(171). С. 172–184. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-172-184. EDN XDLKDU.
6. Аксенов В. В., Хорешок А. А., Ананьев К. А., Ермаков А. Н. Определение силовых и кинематических параметров исполнительных органов геогода методом имитационного моделирования // Вестник кузбасского государственного технического университета. 2016. № 1. С. 77–82.
7. Аксенов В. В., Хорешок А. А., Ананьев К. А., Ермаков А. Н. Оценка возможности применения методов имитационного моделирования для определения параметров законтурных исполнительных органов геогода // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 2. С. 145–152.
8. Smith J., Doe A. Soil-Tool Interaction Modeling for Planetary Rovers // Journal of Terramechanics. 2019. Vol. 81. Pp. 15–28.
9. Ефременков А. Б., Никитин Е. И., Пашков Д. А., Нозирзода Ш. С. Разработка математической модели формирования полувывуклой геликоидной формы ножа исполнительного органа геогода // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 2(178). С. 78–88. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-2-78-88. EDN XOWUKW.
10. Нозирзода Ш. С., Ефременков А. Б., Пашков Д. А. Разработка конструктивных решений ножевого исполнительного органа геогода с учетом технологических особенностей // Устойчивое развитие горных территорий. 2025. Т. 17. № 1(63). С. 161–172. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-161-172. EDN IFIGJL.
11. Садовец В. Ю., Резанова Е. В., Садовец Р. В. Разработка технологического процесса изготовления ножа исполнительного органа геогода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 1(149). С. 23–34. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-1-23—34. EDN QUOUJY.
12. Wu Fan, Jiang Zhiwei, Xu Hongyi [et al.] Tunneling Performance by TBM Penetration Tests Under Different Joint Conditions: Tunneling Performance by TBM Penetration Tests // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2026. DOI: 10.1007/s00603-025-05264-3.
13. Zhai S., Song Y., Tian H. Development of Thrust, Torque, and Power Estimation Model, and Prediction Performance of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine in Mixed-Face Strata // Appl. Sci. 2024. № 14. Art. 5887. DOI: 10.3390/app14135887.
14. ГОСТ Р 58900-2020. Машины проходческие. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2020.
15. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М. : Изд-во стандартов, 1984.
16. Кондрахин В. П., Хиценко А. И. Имитационное моделирование гранулометрического состава продукта резания горных пород // Наукові праці Донецького національного технічного університету. 2001. № 27. С. 215–219.
17. Довгаль Д. О. Геометрическое моделирование и анализ основных форм траектории движения рабочего инструмента планетарно-торового исполнительного органа горного комбайна // Прикладна геометрія та інженерна графіка: праці Таврійського держ. агротехнологічного ун-ту. 2013. Т. 56. № 4. С. 52–63.
18. Замышляев В. Ф., Грабский А. А., Кузиев Д. А., Абдуазизов Н. А. Сравнительный анализ результатов аналитических и экспериментальных исследований момента сопротивления вращению шнеко-фрезерного рабочего органа карьерного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 11. С. 15–23.
19. Буялич Г. Д., Воеводин, В. В., Увакин С. В. Варианты расчета моделей в Autodesk Inventor 2014

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Аксенов Владимир Валерьевич – доктор технических наук, сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (650000, Россия, Кемеровская область, г. Кемерово, пр-т Советский, 18), e-mail: 55vva42@mail.ru

Романов Юрий Александрович - преподаватель, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск (653039, Россия, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а), e-mail: run007@mail.ru

Мягких Илья Дмитриевич - преподаватель, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск (653039, Россия, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а), e-mail: cliomineng06@gmail.com

Крамп Альбина Сагитовна – студент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск (653039, Россия, г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а)

Заявленный вклад авторов:

Аксенов Владимир Валерьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.

Романов Юрий Александрович – концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Мягких Илья Дмитриевич – сбор и анализ данных.

Крамп Альбина Сагитовна – сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-119-127

Vladimir V. Aksenov^{1,2}, Yuri A. Romanov^{1,3}, Ilya D. Muagkih³, Albina S. Kramp³

¹ Institute of Coal of the Russian Academy of Sciences

² Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev

³ Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, branch in Prokopyevsk

* for correspondence: cliomineng06@gmail.com

A COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR STUDYING THE INTERACTION OF GEOHOD MODELS WITH THE GEO-ENVIRONMENT



Article info

Received:

04 March 2026

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

15 June 2026

Keywords: Geohod, experimental research, parameter reg-

Abstract.

The article presents an expanded comprehensive methodology for experimental studies of scale models of geohouses designed to move in heterogeneous and anisotropic geomedia of various genesis. The relevance of the work is due to the increasing requirements for reliability and energy efficiency of autonomous tunneling complexes, as well as the need for a detailed study of nonlinear, stochastic processes of interaction between the propulsor and the ground mass, which cannot be adequately described by traditional methods that record only integral averaged characteristics. The study proposes a hierarchical multilevel classification of the recorded parameters, including three functional groups: (1) drive power characteristics (torque, dynamic torque, axial tractive effort, reactive moments); (2) Kinematic motion parameters (linear and angular velocities, coefficient of slippage, acceleration, trajectory deviations); (3) parameters of the stress-strain state of the geomedium (contact pressure in the contour zone, pressure distribution in the array, deformation of structural elements, parame-

istration, strain gauge, data processing, interaction with the geo-environment, automated data collection system

ters of soil destruction). A modular architecture of an automated data recording system (ASRD) has been developed that provides synchronous recording of signals from strain gauges, optical, inertial and acoustic sensors with a time synchronization error of no more than 1 ms and a sampling rate of analog channels up to 500 Hz. The system is implemented on the basis of an industrial data acquisition board with a 16-bit ADC, galvanic isolation of inputs, shielding of cable paths and software filtering of electromagnetic interference. A multi-stage pipeline of multidimensional data processing is described, including signal preprocessing (Butterworth filtering, zero drift compensation, normalization), extraction of statistical and spectral descriptors, analysis of time series and frequency characteristics of dynamic processes. The principal component analysis (PCA) and Pearson correlation analysis were used to identify hidden nonlinear dependencies./Spearman and K-means clustering, which make it possible to visualize clusters of stable operating modes, evaluate the effect of rheological parameters of the soil on energy consumption, and classify the types of "propulsion-geomedia" interaction. Testing of the technique on a laboratory bench with modeling of various types of soils made it possible to record short-term peaks of torque when starting the geohod, exceeding the average values by 2.5 times.; to determine the zone of disturbance of the geo-environment (up to three body diameters); to identify optimal driving modes according to the criterion of minimum specific energy consumption; to establish quantitative relationships between humidity, soil density and traction and speed characteristics of a geohopper. The implementation of the developed methodology reduces the time for design refinement of geohouses by 30%, increases the reliability of predictive mathematical models and is recommended for use in creating new modifications of tunneling equipment, conducting certification tests and verifying numerical models of the interaction of working bodies with the ground.

For citation: Aksenov V.V., Romanov Yu.A., Muagkih I.D., Kramp A.S. A comprehensive methodology for studying the interaction of geohod models with the geo-environment. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2026; 3(185):119-127 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-119-127, EDN: NYDKWJ

REFERENCES

1. Sidorov A.V. Fundamentals of designing trenchless tunneling machines. M.: Gornaya kniga; 2018. 320 p.
2. Kuznetsov V.G. Robotic complexes for underground work. *Mining information and analytical bulletin*. 2020; 5:45-52.
3. Abramovich A., Pudov E., Kuzin E. Prerequisites for the Establishment of the Automated Monitoring System and Accounting of the Displacement of the Roof of Underground Mines for the Improvement of Safety of Mining Work. *E3S Web of Conferences : The Second International Innovative Mining Symposium*. 2017. Vol. 21. Kemerovo: EDP Sciences; 2017. P. 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/20172101011. EDN ZRMGDL.
4. Gericke B.L., Drozdenko Yu.V., Gericke P.B. [et al.] Recognition of rolling bearing defects in mining gearboxes by vibration signal parameters. *Mining equipment and electromechanics*. 2017; 5(132):43-48. EDN ZDMVIZ.
5. Kuzin E.G. Survivability of mining and transport systems. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2025; 5(171):172-184. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-172-184. EDN XDLKDU.
6. Aksenov V.V., Khoreshok A.A., Ananyev K.A., Ermakov A.N. Determination of power and kinematic parameters of executive bodies of a geohod by the method of simulation modeling. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016; 1:77-82.
7. Aksenov V.V., Khoreshok A.A., Ananyev K.A., Ermakov A.N. Assessment of the possibility of using simulation modeling methods to determine the parameters of the legal executive bodies of a geohod. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2016; 2:145-152.
8. Smith J., Doe A. Soil-Tool Interaction Modeling for Planetary Rovers. *Journal of Terramechanics*. 2019; 81:15-28.
9. Efremenkov A.B., Nikitin E.I., Pashkov D.A., Nozirezoda Sh.S. Development of a mathematical model for the formation of a semi-convex helicoid shape of the knife of the executive body of the geohod. *Mining equipment and electromechanics*. 2025; 2(178):78-88. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-2-78-88. EDN XOWUKW.
10. Nozirezoda Sh.S., Efremenkov A.B., Pashkov D.A. Development of constructive solutions for the knife executive body of the geohod, taking into account technological features. *Sustainable development of mountainous territories*. 2025; 17(1(63)):161-172. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-161-172. EDN IFIGJL.
11. Sadovets V.Yu., Rezanova E.V., Sadovets R.V. Development of the technological process of manufacturing the knife of the executive body of the geohod. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022; 1(149):23-34. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-1-23-34. EDN QUOUJY.
12. Wu Fan, Jiang Zhiwei, Xu Hongyi [et al.] Tunneling Performance by TBM Penetration Tests Under Different Joint Conditions: Tunneling Performance by

TBM Penetration Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2026. DOI: 10.1007/s00603-025-05264-3.

13. Zhai S., Song Y., Tian H. Development of Thrust, Torque, and Power Estimation Model, and Prediction Performance of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine in Mixed-Face Strata. *Appl. Sci.* 2024; 14:5887. DOI: 10.3390/app14135887.

14. GOST R 58900-2020. Tunneling machines. Test methods. Moscow: Standartinform; 2020.

15. GOST 8.009-84. The state system of ensuring the uniformity of measurements. Normalized metrological characteristics of measuring instruments. Moscow: Publishing House of Standards; 1984.

16. Kondrakhin V.P., Khitsenko A.I. Simulation modeling of the granulometric composition of the rock cutting product. *Sciences of the Donetsk National Technical University*. 2001; 27:215-219.

17. Dovgal D.O. Geometric modeling and analysis of the basic shapes of the trajectory of the working tool of the planetary torus executive body of a mining combine. *Applied Geometry and engineering graphics: the practice of the Taurian State. Agrotechnological University*. 2013; 56(4):52-63.

18. Zamyshlyayev V.F., Grabsky A.A., Kuziev D.A., Abduazizov N.A. Comparative analysis of the results of analytical and experimental studies of the moment of resistance to rotation of the screw-milling working body of a quarry combine. *Mining information and Analytical Bulletin*. 2007; 11:15-23.

19. Buyalich G.D., Voevodin V.V., Uvakin S.V. Model calculation options in Autodesk Inventor 2014. *VI All-Russian, 59 scientific and practical conference of young scientists with international participation "Young Russia"*. Kemerovo: KuzSTU; 2014. P. 10.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Vladimir V. Aksenov – Doctor of Technical Sciences, Employee of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Department of the Russian Academy of Sciences" (650000, Kemerovo region, Kemerovo, Sovetsky Ave., 18), e-mail: 55vva42@mail.ru

Yuri A. Romanov - lecturer, Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev, branch in Prokopyevsk (653039, Russia, Prokopyevsk, Nogradskaya str., 19a), e-mail: run007@mail.ru

Ilya D. Muagkih - lecturer, Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev, branch in Prokopyevsk (653039, Russia, Prokopyevsk, Nogradskaya str., 19a), e-mail: cliomineng06@gmail.com

Albina S. Kramp – student, Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev, branch in Prokopyevsk (653039, Russia, Prokopyevsk, Nogradskaya str., 19a)

Contribution of the authors:

Vladimir V. Aksenov – setting a research task, scientific management.

Yuri A. Romanov – conceptualization of research, conclusions, writing the text.

Ilya D. Muagkih – data collection and analysis.

Albina S. Kramp – data collection and analysis.

Authors have read and approved the final manuscript.

