



УДК 620.1.05:622.267

ОБЗОР ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ ГЕОХОДОВ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Хорешок А.А.¹, Аксенов В.В.¹, Кузнецов В.В.¹, Марков С.О.^{1,2}, Тюленев М.А.¹

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева



Информация о статье

Поступила:
06 апреля 2026 г.

Рецензирование:
05 июня 2026 г.

Принята к печати:
15 июня 2026 г.

Ключевые слова:

геоход, испытательный стенд, горная техника, горно-геологические условия, геотехнология, физико-механические свойства, автоматизация, подземная разработка, геосреда, исполнительный орган

Аннотация.

Обоснование значимости исследования обусловлено критическим разрывом между точностью компьютерного моделирования и ресурсозатратностью натурных испытаний. Традиционные подходы не учитывают стохастическую природу геосреды, что снижает валидность прогнозов поведения оборудования. Изучаемый вопрос направлен на решение проблемы масштабных эффектов при переходе от лабораторных моделей к полноразмерным прототипам. Ключевыми переменными выступают коэффициент масштабирования, реологические свойства искусственной геосреды и динамические характеристики нагружающих устройств. Методология предполагает проведение серии контролируемых экспериментов с использованием физических моделей, изготавливаемых аддитивными технологиями, и последующую верификацию данных с результатами численного моделирования. Ожидаемые результаты включают разработку методологических рекомендаций по формированию испытательной среды, что позволит повысить достоверность прогнозирования эксплуатационных характеристик горной техники, сократить сроки и стоимость разработки новых классов проходческих аппаратов, а также обеспечить надежную базу для диагностики технического состояния оборудования на этапе послеремонтных испытаний.

Целью данного обзора является систематизация и анализ существующих конструкций и методов стендовых испытаний горнопроходческого оборудования, выявление их преимуществ и недостатков, а также определение перспективных направлений развития стендовой базы на основе анализа российских и зарубежных источников.

Для цитирования: Хорешок А.А., Аксенов В.В., Кузнецов В.В., Марков С.О., Тюленев М.А. Обзор испытательных стендов геоходов: текущее состояние проблемы, перспективы развития // Техника и технология горного дела. – 2026. – №2(33). – С. 31-58. – DOI:10.26730/2618-7434-2026-2-31-58, EDN: AQUOFX

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2026-0001 «Разработка комплексных геотехнологий добычи запасов угля в сложных горно-геологических условиях без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, а также методов повышения эффективности эксплуатации и контроля технического состояния роботизированного оборудования» (рег. № 1023032000051-1-1.5.1; 2.7.5).

Введение

Интенсивность освоения подземного пространства странами мирового сообщества, включая Россию, постоянно увеличивается. Это связано в том числе с развитием новых технологий строительства подземного пространства [43].

Подавляющий процент объем строительства подземных сооружений различного назначения приходится на импортную проходческую технику. В соответствии со сложившимся вектором развития, перспективным способом проведения горных выработок является геовинчестерная технология, базовым элементом которой является такой класс горнопроходческой техники как геоход (рис. 1), т.е. аппарат для механизированной проходки горных выработок, использующий геосреду для движения в подземном пространстве [44].

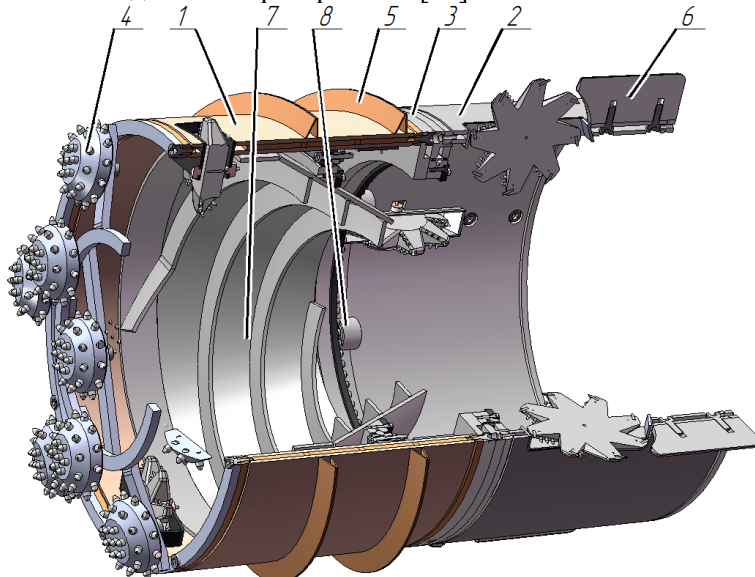


Рис. 1. Геоход и его основные системы: 1 – головная секция, 2 – стабилизирующая (хвостовая) секция, 3 – узел сопряжения секций, 4 – исполнительный орган разрушения забоя, 5 – внешний движитель с исполнительными органами, 6 – элементы противовращения с исполнительными органами, 7 – погрузочно-транспортная система, 8 – трансмиссия

Fig. 1. Geokhod and its main systems: 1 – head section, 2 – stabilizing (tail) section, 3 – section coupling assembly, 4 – bottom-hole breaking actuator, 5 – external propulsion unit with actuators, 6 – anti-rotation elements with actuators, 7 – loading and transport system, 8 – transmission

Необходимость развития технологий и техники для освоения подземного пространства определяется в Российской Федерации на законодательном уровне и отмечается во многих научных работах. В программах развития и импортозамещения тяжелого машиностроения также отмечается необходимость разработки техники для ведения проходческих работ, что свидетельствует о недостаточной развитости данного направления [45].

Для исследования взаимодействия резцового инструмента с породой, исследования напряженно-деформированного состояния элементов конструкции геохода в местах их сопряжения друг с другом и под воздействием геосреды во время его работы, широкое применение находят методы конечных и дискретных элементов. Такие исследования направлены, как правило, на уточнение зависимостей усилий резания и подачи для различных условий, что сопровождается, как правило, проведением стендовых испытаний и подтверждением разрабатываемых моделей в реальных условиях работы [45-47].

Испытательные стенды занимают ключевое место в процессе разработки, доводки и сертификации горнопроходческого оборудования, в том числе, геоходов. Они позволяют моделировать условия эксплуатации горных машин в контролируемой лабораторной или производственной среде, оценивать их технические характеристики, надежность и долговечность до начала натурных испытаний или промышленной эксплуатации.

Актуальность использования испытательных стендов определяется несколькими факторами. Во-первых, современные методы компьютерного моделирования, несмотря на их широкое распространение, не в полной мере обеспечивают достоверную оценку поведения горных машин в реальных горно-геологических условиях, поскольку они базируются на



упрощенных моделях геосреды, не учитывающих ее неоднородность и изменчивость свойств [1]. Это обусловлено тем, что численные модели базируются на упрощенных представлениях геосреды, не учитывающих ее неоднородность, наличие включений и изменчивость физико-механических свойств.

Во-вторых, натурные испытания в реальных горных выработках чрезвычайно дорогостоящи, трудозатратны и часто сопряжены со значительными рисками. В то же время натурные и стендовые испытания полноразмерных образцов, хотя и позволяют получить более точные данные, связаны с высокими временными, трудовыми и финансовыми затратами. К недостаткам существующих подходов относятся сложности с поддержанием стабильности геосреды, а также ограниченные возможности по оперативному изменению условий испытаний [1].

В-третьих, процессы импортозамещения в российской горной промышленности требуют ускоренной разработки и испытаний новых образцов отечественной техники, что невозможно без современной стендовой базы. Отсутствие специализированной методологии на этапе испытаний является сдерживающим фактором при создании новых классов проходческих аппаратов, взаимодействующих с геосредой [10].

Материалы и методы

1. Методы и исторический обзор развития стендовых испытаний горной техники

Физическое моделирование с использованием масштабных аналогов базируется на принципах подобия, позволяющих воспроизвести поведение горнопроходческой техники в контролируемых лабораторных условиях. Применение масштабных моделей, в том числе изготовленных методами 3D-печати, обеспечивает гибкость конструкции и оперативность изготовления прототипов, что критически важно для исследования новых классов проходческих аппаратов. Ключевым преимуществом метода является возможность многократного повторения экспериментов при значительно меньших временных и финансовых затратах по сравнению с натурными испытаниями полноразмерных образцов. Использование управляемой испытательной среды повышает точность и информативность получаемых данных, способствуя ускорению процессов проектирования и повышению конкурентоспособности отечественной горной техники [1, 4].

Ограничения метода включают необходимость строгого соблюдения критериев подобия, что усложняет масштабирование физикомеханических свойств горной породы и конструкционных материалов. Существует риск искажения результатов из-за несоответствия реальных геологических условий лабораторным параметрам среды. В качестве потенциального решения предлагается разработка композиционных материалов для моделей, чьи свойства адаптированы под конкретные критерии подобия, а также использование методов машинного обучения для коррекции результатов моделирования на основе данных натурных испытаний.

Комплексный стендовый анализ с применением электромеханических нагружающих систем на основе асинхронных двигателей предполагает создание специализированных испытательных стендов, конструктивно состоящих из заготовки, подсистемы нагружения и контрольно-измерительных устройств. Использование энергоэффективных электромеханических устройств на базе асинхронных машин позволяет воссоздавать реалистичную нагрузку как в статическом, так и в динамическом режимах. Преимущества метода заключаются в высокой результативности по сравнению с существующими аналогами, возможности реализации необходимого закона нагружения с помощью управляемого преобразователя электрической энергии и обеспечения энергоэффективности процесса. Данный подход способствует выявлению скрытых ошибок проектирования и повышению достоверности экспериментальных данных [1].

Ограничения метода связаны с высокими требованиями к универсальности и сложности интеграции нагружающих устройств в единую автоматизированную систему управления. Риск заключается в возможных технических сбоях при динамическом нагружении мощной техники, что может привести к повреждению оборудования или неточности измерений. Альтернативным подходом является внедрение резервных систем безопасности и использование гибридных



нагружающих установок, сочетающих гидравлические и электромеханические приводы для повышения надежности в экстремальных режимах работы.

Метод автоматизированной диагностики и методы послеремонтных испытаний с применением статического токового нагружения ориентированы на обеспечение высокого качества ремонта и снижение вероятности поломок путем проведения испытаний под нагрузкой, приближенной к эксплуатационным условиям. Метод включает этапы статического токового нагружения, а также динамического токового и механического нагружения. Применение данного подхода перспективно для крупных машин в условиях ремонтных предприятий, где реализация методов механического агрегирования с традиционными нагрузочными устройствами затруднена. Преимущества метода заключаются в возможности надежной диагностики технического состояния существующей техники и минимизации аварийных отказов [10].

Ограничения метода связаны с узкой специализацией оборудования, предназначенного преимущественно для электрических машин, что требует адаптации методики для других узлов горнопроходческого оборудования. Риск заключается в отсутствии стандартизированных процедур для оценки остаточного ресурса после статического нагружения. В качестве решения предлагается разработка универсальных алгоритмов анализа данных, собираемых с различных датчиков, и интеграция методов неразрушающего контроля для комплексной оценки состояния оборудования.

Системный подход к разработке стендов с использованием специализированного программного обеспечения для управления испытаниями предполагает автоматизацию процесса испытаний через внедрение специализированного программного обеспечения, обеспечивающего контроль за ходом экспериментов и регистрацию реакции образца на заданные виды и величины нагрузки. Актуальность метода обусловлена необходимостью выбора эффективных методов разработки стендов в сжатые сроки и способностью ПО выявлять скрытые ошибки проектирования на основе анализа параметров реакции образца. Преимущества включают постоянный контроль за ходом исследований, снижение затрат и возможность оперативного изменения условий испытаний [1].

Ограничения метода связаны с высокими требованиями к квалификации персонала для работы с сложным программным обеспечением и рисками программного сбоя, влияющими на целостность эксперимента. Риск потери данных в случае отказа системы управления является существенным фактором. В качестве альтернативного подхода рассматривается использование распределенных систем сбора данных с дублированием ключевых узлов управления и внедрение облачных технологий для резервного копирования и обработки результатов в реальном времени.

1.1. Ранний период (1970-1980-е годы)

Развитие стендовых испытаний горнопроходческого оборудования в СССР началось в 1970-х годах, что было связано с активным освоением новых месторождений полезных ископаемых и необходимостью создания высокопроизводительной проходческой техники.

Одним из ранних примеров является стенд для исследования исполнительных органов проходческих машин, разработанный в Институте геотехнической механики АН УССР и Научно-исследовательском горнорудном институте (авторское свидетельство СССР № 457798 от 1973 года) [8].

Конструкция этого стенда включала следующие основные элементы:

- раму с подвижной кареткой;
- гидроцилиндры подачи;
- привод вращения с коническим редуктором;
- короб с образцом разрушаемой породы;
- лебедку для изменения угла наклона;
- фиксирующую раздвижную стойку.

Принципиальной особенностью данного стенда была возможность изменения угла наклона оси вращения исполнительного органа относительно горизонтали и фиксации его положения под любым углом. Это позволяло моделировать проходку выработок с различными углами наклона — от горизонтальных до вертикальных. Стенд оснащался необходимой контрольно-



измерительной аппаратурой для регистрации параметров процесса разрушения породы и рабочих характеристик испытуемого органа [8].

В 1980-х годах в Ленинградском горном институте (ныне – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II) активно развивались исследования в области электромеханических испытательных стендов. Как отмечено в трудах Горного института за 1982 год, в тот период получили распространение два типа электромеханических стендов [9]:

- 1) Нагрузочные стенды – для испытаний электродвигателей и механического оборудования в условиях нагружения, максимально приближенных к реальным эксплуатационным нагрузкам.
- 2) Воспроизводящие стенды – для испытания систем управления и регуляторов в связке с электромеханической моделью, воспроизводящей с высокой степенью приближения параметры и характеристики реальной силовой электромеханической, гидромеханической или иной системы.

В этих работах подробно рассматривались вопросы создания нагрузочных устройств на базе машин постоянного тока с независимым возбуждением, управляемых тиристорными преобразователями. Особое внимание уделялось проблеме воспроизведения нестационарных нагрузок, характерных для горных машин [9].

1.2. Период становления геогодной технологии (1980-е – 2010-е годы)

Развитие геогодов (изначально называвшихся винтоповоротными проходческими агрегатами – ВПА) началось в середине 1980-х годов прошлого столетия [1]. Первые натурные испытания элемента ВПА «ЭЛАНГ-3» продемонстрировали принципиальную работоспособность данной технологии, однако выявили значительную дороговизну и большую трудоемкость проведения подобных испытаний [1].

В 2016 году на АО «КОРМЗ» прошли стендовые испытания геогода модели «401» (рис. 2) в полную величину диаметром 3,2 м [1, 6, 48].

В ходе испытаний было продемонстрировано движение геогода в стенде, подтверждена штатная работа всех систем. Однако последовавшие затем натурные испытания выявили ряд недостатков:

- неудовлетворительная работа автоматизированной системы управления;
- крупногабаритная энергосиловая система;
- проблемы с вращающейся внутренней частью головной секции [1].

2. Классификация испытательных стендов

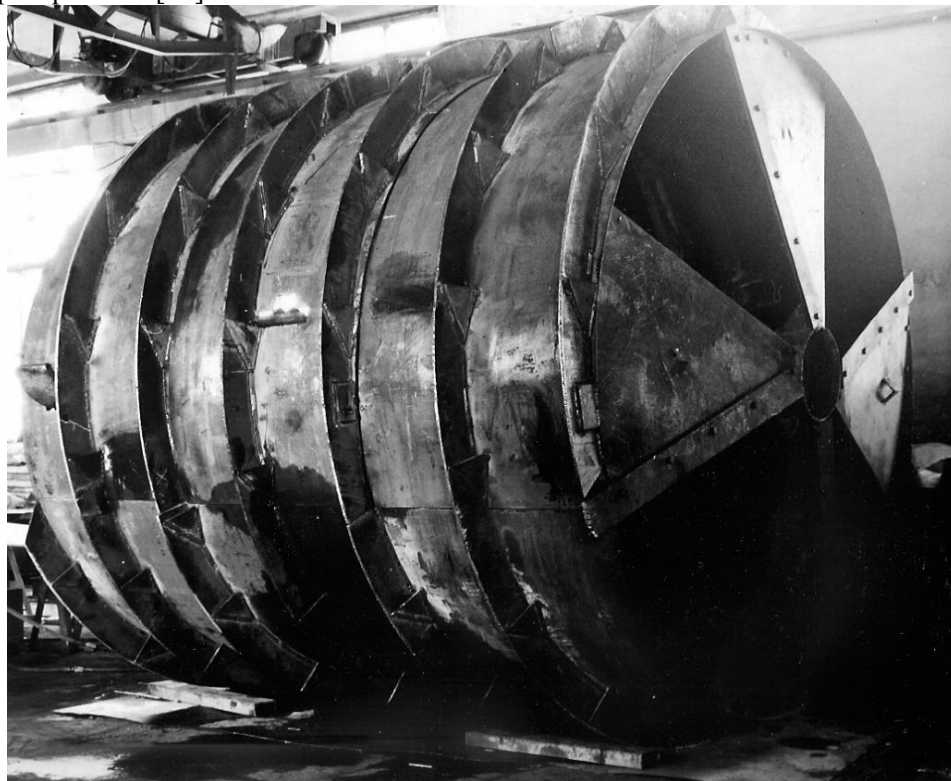
Для решения выявленных проблем предлагается создание лабораторных и промышленных стендов, предназначенных для тестирования масштабных моделей горнопроходческой техники [1, 18]. На основе анализа литературных источников можно предложить следующую классификацию испытательных стендов горнопроходческого оборудования:

2.1. По масштабу испытаний

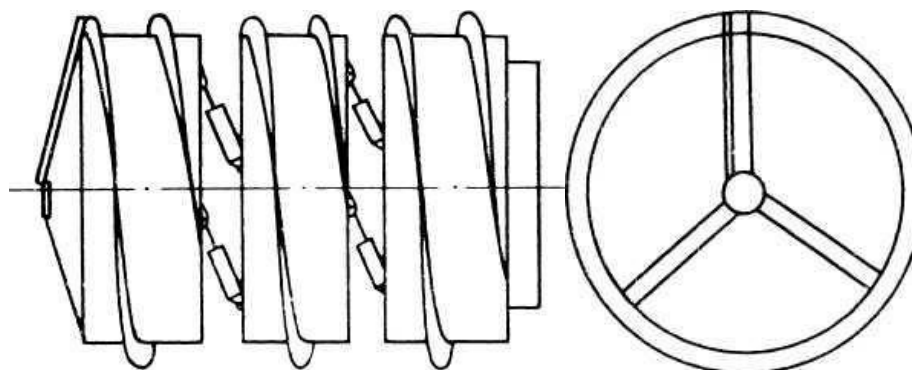
Полномасштабные стенды предназначены для испытаний оборудования в натуральную величину. Их преимущество – максимальное соответствие реальным условиям эксплуатации. Недостатки – высокая стоимость сооружения, сложность внесения изменений в конструкцию и условия испытаний, значительные временные и трудовые затраты [1, 6].

Масштабные стенды используют уменьшенные модели оборудования. Ключевые преимущества: возможность быстрой замены испытуемых образцов (в том числе изготовленных методами 3D-печати), наглядность процессов, меньшие затраты на проведение экспериментов. Использование масштабных стендов в сочетании с управляемыми условиями испытательной среды позволяет значительно повысить точность и информативность получаемых данных. Подобный подход способствует ускорению процессов проектирования, снижению затрат на разработку прототипов и повышению конкурентоспособности отечественной горной техники. Недостаток – необходимость корректного масштабирования результатов [1, 4]. Тем не менее, создание такого технологического уклада, аналогичного опыту авиастроения с его полигонами

и полномасштабными лабораторными установками, является ключевым элементом освоения подземного пространства [10].



а)



б)

Рис. 2. ВПА ЭЛАНГ-3: а) общий вид; б) принципиальная схема

Fig. 2. Screw-rotary tunneling unit ELANG-3: a) general view; b) schematic diagram

2.2. По назначению

Стенды для испытаний режущего инструмента предназначены для изучения процесса разрушения горных пород различными типами режущих инструментов. Как отмечают сотрудники кафедры «Горная электромеханика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» С. В. Панишев, Е. Л. Алькова, М. С. Максимов и Д. В. Хосоев, такие стенды позволяют оценивать эффективность работы резцов, коронок и шарошек при различных режимах резания. Спроектированный ими лабораторный режуще-испытательный стенд на базе поперечно-строгального станка 7307ТД является физической моделью механизма разрушения породного массива одиночным резцом горного комбайна. Стенд позволяет определить силовые параметры и энергетические показатели процесса разрушения блоков горных пород одиночным резцом, выполнить исследования гранулометрического состава продуктов разрушения [5].



Стенды для испытаний трансмиссий и приводов используются для обкатки и приемочных испытаний механических передач. Современные стенды этого типа, как правило, строятся по схеме взаимного нагружения (замкнутого контура мощности), что позволяет существенно повысить энергоэффективность испытаний за счет рекуперации энергии. Например, разработанный Малафеевым С.И., Малафеевой А.А., Коняшиным В.И. и Новгородовым А.А. стенд предназначен для обкатки (приработки сопряженных соединений) и контроля качества изготовления и сборки редукторов лебедок подъема и напора электрических карьерных экскаваторов типа ЭКГ в условиях приемо-сдаточных испытаний. На основе составленного математического описания мехатронных систем выполнено исследование процессов при обкатке редуктора напора ЭКГ-15Мс помощью программного комплекса Matlab Simulink. Разработанный стенд реализован в ООО Компания «Объединенная Энергия» и внедрен в ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» [3]. Данный стенд может быть адаптирован для испытания силовой установки геогода.

Стенды для испытаний систем управления предназначены для отработки алгоритмов управления в условиях, приближенных к реальным. Часто реализуются на базе электромеханических или гидравлических модельных комплексов [9].

Многоцелевые исследовательские стенды позволяют проводить широкий спектр испытаний различных узлов и агрегатов. Примерами являются современные стенды для испытаний геогодов и исполнительных органов проходческих машин [1, 5].

2.3. По типу нагружения

Стенды с механическим нагружением используют для создания нагрузок механические устройства (тормозные установки, грузы, пружины). Отличаются простотой, но ограничены в диапазоне и точности воспроизведения нагрузок. По предлагаемой в [15] классификации, исследуемым объектом может выступать механическое, гидравлическое, электромеханическое приводное устройство (замкнутого или разомкнутого типа) или отдельное механическое звено (трансмиссия), т.е., по сути, любой элемент конструкции геогода.

Стенды с гидравлическим нагружением применяют гидроцилиндры и гидромоторы для создания нагрузок. Обеспечивают широкий диапазон усилий и высокую точность управления. Широко используются в современных стендах для испытаний горной техники [7, 8].

Например, стенд для испытаний объектов однократными знакопеременными ударными импульсами перегрузки содержит основание с направляющими, ствол для разгона ударника, тормозное устройство и перемещаемую между ними по направляющим платформу для размещения с противоположных ее сторон соосно стволу двух цилиндрических резервуаров с жидкостью и объекта испытаний в контейнере [16]. Объектом испытаний может являться силовая установка геогода или иные элементы его конструкции, испытывающие значительные знакопеременные механические нагрузки при работе.

Стенды с электромеханическим нагружением базируются на электрических машинах (обычно постоянного тока) в качестве нагрузочных устройств. Позволяют гибко управлять режимами нагружения и осуществлять рекуперацию энергии. Активно развивались в 1980-х годах и сохраняют актуальность сегодня [3, 9].

В зависимости от направления потока энергии можно выделить три способа реализации стендов.

- 1) Для стендов с отсутствием рекуперации характерна простота реализации нагрузочного устройства. Обычно это фрикционные, аэродинамические, гидравлические, электромагнитные тормоза или электрические машины, работающие в режимах динамического торможения и торможения противовключением. Такие устройства характеризуются большой потерей энергии, расходуемой на трение или выделяющейся в добавочных сопротивлениях и, как следствие, низким КПД.
- 2) Рекуперация энергии в сеть требует усложнения нагрузочной части стенда и экономически оправдана при испытаниях машин средней и большой мощности. В настоящее время широко применяются электромашинные нагрузочные устройства,



представляющие собой систему «генератор-двигатель-генератор» либо «генератор-вентильный преобразователь», причем во втором случае КПД системы повышается за счет уменьшения числа ступеней преобразования энергии. Вентильный преобразователь может быть как управляемым, так и неуправляемым.

- 3) Наиболее экономичным является стенд с рекуперацией энергии в привод. В этом случае нагрузочное устройство работая в режиме генератора отдает всю выработанную энергию исследуемой машине. Работая в режиме двигателя, она расходует свою механическую энергию на вращение вала нагрузочного устройства. При этом из сети потребляется мощность, необходимая только для покрытия потерь. Это позволяет при значительной мощности испытываемого оборудования пользоваться ограниченным источником энергии [15].

2.4. По степени автоматизации

Ручные стенды требуют непосредственного участия оператора для управления режимами испытаний и регистрации данных. Характерны для ранних конструкций и простых испытательных операций.

Автоматизированные стенды оснащены системами сбора данных и частично автоматизированным управлением. Оператор задает программу испытаний, а система контролирует параметры и фиксирует результаты.

Роботизированные стенды с полной автоматизацией испытательного процесса позволяют проводить длительные циклические испытания без участия человека, автоматически генерировать отчеты и анализировать большие массивы данных. Примером является стенд для испытаний трансмиссий горных экскаваторов на базе информационно-диагностической системы «Пульсар-7» [3].

3. Анализ конструкций и методов испытаний

Испытательный стенд конструктивно состоит из заготовки, удерживающей объект испытания, подсистемы нагружения и контрольно-измерительного устройства, регистрирующего реакцию образца [4]. К нагружающим устройствам комплексных стендов предъявляются требования энергоэффективности, универсальности и способности воссоздавать реалистичную нагрузку как в статике, так и в динамике. Особое внимание уделяется энергоэффективности, особенно при испытаниях такой мощной техники, как геходы, где электромеханические устройства на основе асинхронных машин показывают высокую результативность по сравнению с существующими аналогами. Обязательным элементом является управляемый преобразователь электрической энергии, позволяющий реализовать необходимый закон нагружения [11].

3.1. Стенды для испытаний режущего инструмента

Исследованию методов и конструкций стендов для изучения процесса резания горных пород посвящена работа Панишева С.В., Алковой Е.Л., Максимова М.С. и Хосоева Д.В. «Анализ методов и конструкций испытательных стендов для изучения процесса резания горных пород различными типами режущих инструментов горного оборудования», опубликованная в 2023 году в журнале «Горная промышленность» [5].

Основные требования к стендам данного типа включают:

- возможность точного контроля усилий резания и подачи;
- стабильное воспроизведение свойств горной породы (или ее эквивалента);
- регистрацию энергопотребления и тепловых режимов инструмента;
- визуализацию процесса резания для изучения механизма разрушения породы.

В работе отмечается, что развитие аддитивных технологий (3D-печати) открывает новые возможности для создания сложных геометрических форм режущих инструментов и их быстрого прототипирования для стендовых испытаний [1, 5].

Известны установки для испытания на износ материала рабочих органов почвообрабатывающих машин, принцип действия которой возможно масштабировать для



создания основы стенда испытания режущих органов геохода в реальной среде. Установки содержит станину, установленные на ней привод возвратно-поступательного перемещения образца, связанный с приводом держатель образца, предназначенного для взаимодействия с имитатором почвы (для стенда геохода – с имитатором горной породы или непосредственно с горной породой) и соединенного с держателем образца узла нагружения. Привод возвратно-поступательного перемещения образца выполнен в виде насосного блока и связанного с ним гидродвигателя возвратно-поступательного действия, держатель образца выполнен в виде шарнирно-параллелограммного устройства, узел нагружения закреплен на одном его звене, один конец которого предназначен для закрепления на нем образца, связь привода возвратно-поступательного перемещения образца с его держателем выполнена в виде штанги [19]. Помимо описанной установки имеются патенты на иные конструкции, которые могут быть использованы для испытаний ножевых исполнительных органов геоходов [22, 23].

3.2. Стенды для испытаний геоходов

Геоход представляет собой принципиально новый класс горнопроходческой техники, движение которой основано на винтовом взаимодействии корпуса с породным массивом. Стендовые испытания геоходов имеют ряд особенностей, подробно рассмотренных в работе коллектива авторов под руководством Аксенова В.В. (Кузбасский государственный технический университет, Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН) [1, 4, 6].

Анализ существующих стендов для испытаний геоходов выявил следующие недостатки [1]:

- невозможность поддержания требуемой стабильности геосреды в стенде – при длительных испытаниях свойства грунта (песка, породной мелочи) изменяются, что искажает результаты;
- большие временные, трудовые и финансовые затраты на постройку стендов – строительство железобетонных или металлических конструкций значительного объема требует миллионов рублей и нескольких месяцев работ;
- сложность расчета итоговых показателей крепости испытательной среды – из-за неоднородности и нестабильности заполнителя;
- невозможность оперативного внесения изменений в испытательную среду – изменение влажности, плотности или гранулометрического состава требует полной перезагрузки стенда;
- невозможность оперативной замены испытуемых элементов – при полномасштабных испытаниях замена вышедших из строя узлов занимает дни и недели;
- сложность производства элементов и образцов в целом – полномасштабные узлы геохода имеют значительные массу и габариты, их изготовление требует крупного литейного и механообрабатывающего производства;
- отсутствие должной регистрации получаемых данных – на ранних стендах контрольные приборы были аналоговыми и не обеспечивали необходимой точности и синхронизации измерений.

В качестве альтернативы предлагается создание лабораторного стенда для испытаний масштабных моделей геоходов, изготавливаемых методами 3D-печати [1, 4]. Такой стенд должен обеспечивать:

- возможность моделирования различных параметров геосреды (плотности, влажности) за счет использования регулируемых эквивалентов;
- визуализацию взаимодействия элементов модели с окружающей средой (например, с помощью прозрачных стенок и высокоскоростной видеосъемки);
- оперативную замену испытуемых образцов (дни заменяются на часы);
- адаптацию стенда под разные исследовательские задачи (универсальность);
- оснащение современной измерительной и регистрирующей аппаратурой (датчики усилий, давлений, деформаций, температур).

В 2020 году был разработан демонстрационный образец геохода диаметром 0,63 м с ножевым исполнительным органом (ННО) выпуклой геликоидной формы, для которого был собран стенд, заполненный речным песком (рис. 3).



Рис. 3. Демонстрационный образец геохода с НИО выпуклой геликоидной формы
Fig. 3. Demonstration model of a geokhod with a convex helical-shaped cutting tool

Эти испытания подтвердили работоспособность концепции, но также показали высокую затратность такого подхода [1, 49, 50].

В качестве подходов для испытания отдельных элементов конструкции геохода можно рассмотреть, например, универсальную испытательную машину ГРМ-1 (рис. 4) с гидравлическим и механическим приводами и неподвижным основанием 1, неподвижно заанкеренным в фундаменте 2 при помощи анкерных болтов 3, на котором жестко закреплена неподвижная П-образная рама, состоящая из пары параллельных друг другу колонн 4, оголовки которых соединены друг с другом в единое целое траверсой 5 с гидропульсатором, а также имеющей подвижную по вертикали раму, собранную из верхней опорной траверсы и подвешенной к ней на паре винтовых тяг 6 нижней траверсы подвижной рамы. Гидравлический привод 7 этой машины (статического или динамического действия), помещенный в неподвижной траверсе 5, упирается плунжером 8 в верхнюю траверсу 9 подвижной рамы, в которую установлен червячный привод 10, перемещающий траверсу 11, подвешенную к верхней траверсе 9 подвижной рамы на паре винтовых тяг 6, в проектное положение [20].

Такая установка может использоваться для испытаний корпуса геохода на радиальные нагрузки, создаваемые геосредой, в которой происходит движение геохода.

В работе [21] приводится описание стенда для испытания исполнительного органа проходческого комбайна (рис. 5).

При моделировании движения геохода 2 с постоянной скоростью V под действием нормальной силы P , установленных в работах [49, 50], между дисками 3 и 9 возникает сила трения, в результате чего вращение стрелы 4 с угловой скоростью φ будет сопровождаться возникновением крутильных автоколебаний нагрузочного диска 6. Из-за наличия дисбаланса на диске 3 возникнут радиальные вынужденные колебания.

При отборе определенного коэффициента трения скольжения между стаканом 5 и втулкой 10, а также упругого элемента 8 можно проимитировать продольную реакцию породы на исполнительный орган геохода. При подборе коэффициента трения между дисками 9 и 3, дисбаланса диска 3 и силы P , можно воспроизвести реакцию геосреды на вращательное движение стрелы 4, имитирующей вращающуюся часть геохода. Имитация сил, проявляющихся вследствие деформации геосреды, осуществляется подбором упругих элементов 8 и их взаимным расположением.



Такой стенд обеспечивает достоверное воспроизведение динамических нагрузок, возбуждаемых в трансмиссии геохода, и может использоваться при проведении динамических испытаний исполнительного органа и трансмиссии геохода в условиях лаборатории или производства на прочность, надежность и долговечность.

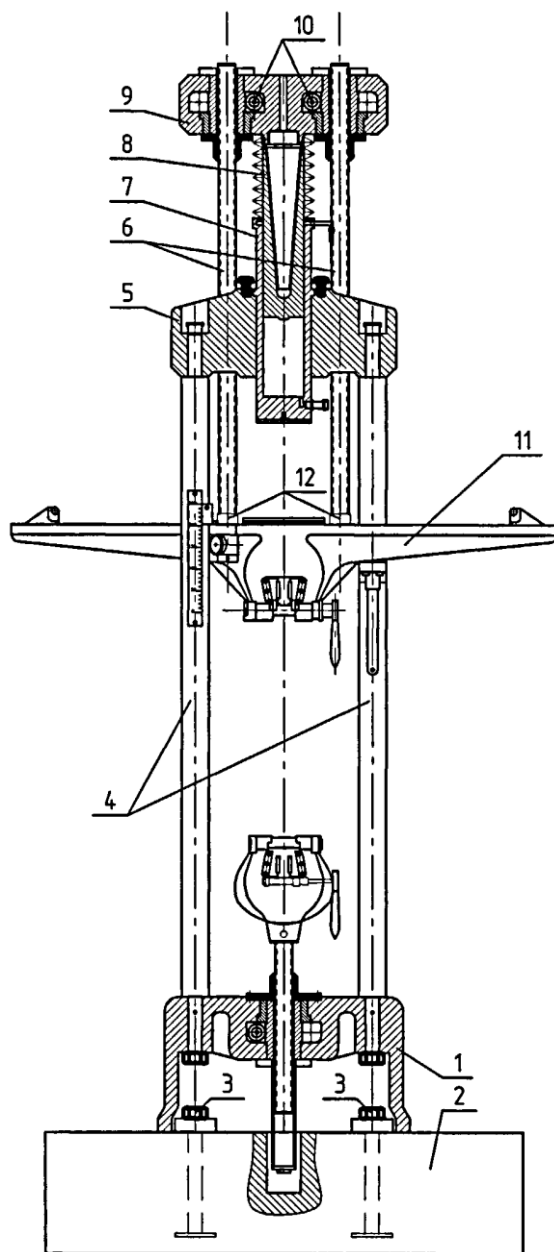


Рис. 4. Испытательная машина ГРМ-1
Fig. 4. GRM-1 test machine

Отдельного внимания требуют устройства крепления различных датчиков и реле на испытательных стендах и испытываемых агрегатах и механизмах (рис. 6).

Данные устройства подробно описаны в [25-28].

Например, конструкция, приведенная в [25], обеспечивает крепление одновременно испытываемых реле до десяти, повышение равноточности измерений, уменьшение потери энергии механического импульса, трудо-, энерго- и ресурсозатрат вибрационного и ударного стендов, трудоемкости и времени испытаний. Это достигается устройством крепления

электромагнитных реле на вибростенде и ударном стенде, содержащим приспособление в форме куба, приспособление фиксации куба, при этом куб выполнен в виде толстостенной квадратной в сечении трубы, имеющей равные длину, ширину, высоту, внутри которой, в центре по высоте, у граней куба расположены, неотъемлемые от граней куба, посадочные места балконного типа для крепления реле [25].

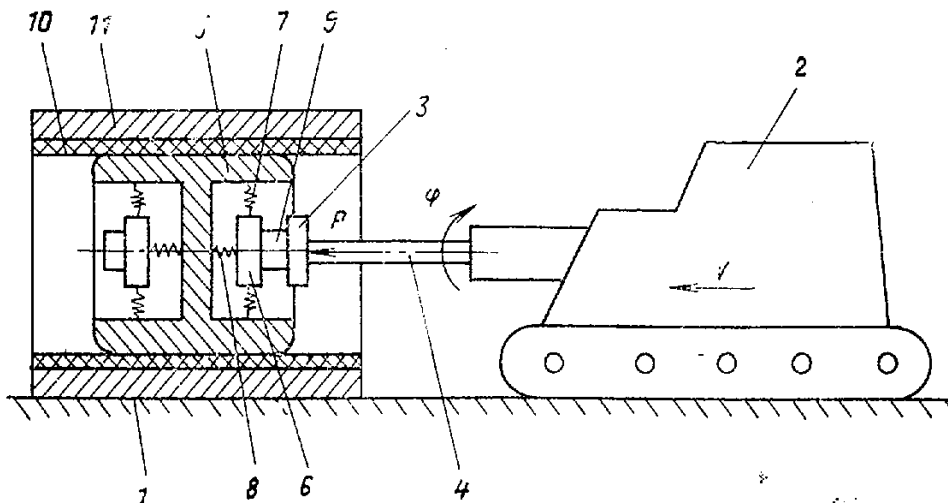


Рис. 5. Стенд для испытаний исполнительного органа проходческого комбайна
Fig. 5. Test bench for the cutting unit of a tunnel boring machine

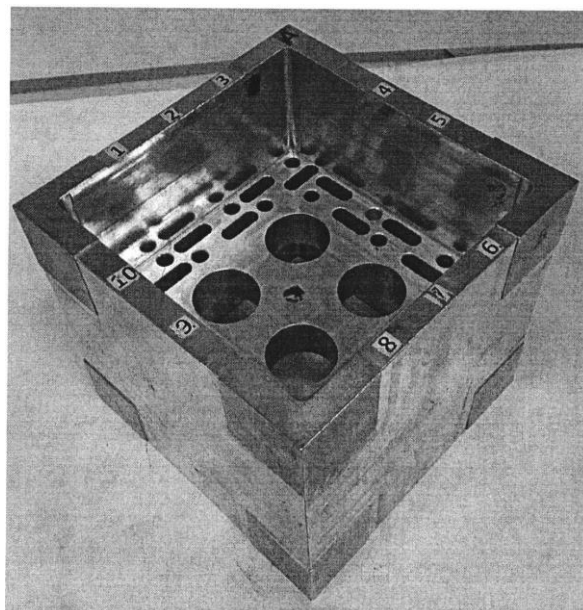


Рис. 6. Устройство крепления одновременно десяти реле
Fig. 6. Device for simultaneously mounting ten relays

3.3. Стенды для испытаний трансмиссий и приводов

Значительный интерес представляет работа по созданию мехатронной системы для обкатки и испытаний механических передач горных экскаваторов, опубликованная в 2025 году в журнале «Горные науки и технологии» [3].

Стенд предназначен для обкатки (приработки поверхностей) и контроля качества редукторов подъемных и напорных лебедок электрических экскаваторов следующих моделей: ЭКГ-8УС, ЭКГ-10, ЭКГ-12К, ЭКГ-15М, ЭКГ-18, ЭКГ-20КМ, ЭКГ-32Р.



Технические характеристики стенда:

Параметр	Значение
Приводные двигатели	350 кВт (двигатели постоянного тока)
Нагрузочный двигатель	560 кВт
Мультипликатор крутящего момента	Редуктор подъемной лебедки ЭКГ-15М

Ключевая особенность стенда – использование метода взаимного нагружения (замкнутого контура мощности), при котором энергия, генерируемая при торможении одной машины, используется для питания другой. Это позволяет существенно снизить потребление электроэнергии в процессе испытаний [3].

Программное обеспечение стенда базируется на информационно-диагностической системе «Пульсар-7» и поддерживает следующие режимы работы [3]:

а) интерактивный ручной контроль – для проверки работоспособности и калибровки компонентов стенда;

б) автоматическое управление – выполнение предварительно запрограммированных последовательностей из встроенной библиотеки. Доступны режимы: обкатка без нагрузки, обкатка при постоянной нагрузке, обкатка при переменной нагрузке и скорости вращения, моделирование цикла экскавации;

в) автоматическая генерация отчетов – с возможностью просмотра и печати ранее сформированных отчетов;

г) программная настройка и вспомогательные функции – включая встроенную справочную систему.

Стенд внедрен на предприятиях «Объединенная энергетическая компания» (Москва) и «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова» [3].

Определенный интерес представляет собой нагружающее устройство для обкатки и испытания элементов машин, в котором устранено основное существенное противоречие: когда обкатка и испытание под нагрузкой продолжительные, то происходит нужная приработка, будет достигнута оптимальная шероховатость трущихся поверхностей; но при этом возрастают энергетические затраты, т.е. приработка и испытания при изготовлении и ремонте становятся высокоэнергетическими. Для устранения данного противоречия созданы нагружающие устройства (нагружатели), в том числе и с использованием сил инерции для создания нагрузки в виде крутящего момента в замкнутом силовом контуре. Данное устройство может быть использовано в испытательном стенде для испытания зубчатых передач, редукторов, муфт, валов геогода [17].

В работе [29] описано устройство для измерения крутящего момента, скорости вращения вала и мощности на валу, которое относится к силоизмерительной технике для стендовых испытаний двигателей, а также для контроля за их работой при эксплуатации, например, роторных ветродвигателей с вертикальным вращающимся валом. Данное устройство может быть применено при испытании соответствующих силовых характеристик трансмиссии и приводов геогода в составе стенда для комплексных испытаний.

Работы [38-42] также представляют интерес в качестве прототипов для создания уникальных стендов для испытания трансмиссии и приводов геогода.

3.4. Стенды для испытаний гидравлических систем

Современные гидравлические системы горных машин требуют тщательной отработки на специализированных стендах. Примером может служить стенд Dolores, разработанный для испытаний гидравлических приводов [7]. Стенд оснащен:

- датчиками давления в 6 точках (Trafag, диапазон до 250 бар);
- датчиками температуры в 7 точках (Müller);
- датчиками расхода (Kracht);
- датчиками положения (Posital fraba);
- датчиками нагрузки (LCM);
- датчиками крутящего момента (KTR DATAFLUX).



Важной особенностью современных гидравлических стендов является наличие антикавитационных устройств и систем гидравлической блокировки, обеспечивающих безопасность и надежность испытаний [7].

Интерес могут представлять конструкции стендов, описанные в [24, 30-37]. Некоторые изменения, которые необходимо внести в описываемые конструкции, могут иметь существенное значение для адаптации предлагаемых решений для их применения в составе стендов испытания гидравлических систем геохода.

Результаты и обсуждение

4. Сравнительный анализ российского и зарубежного опыта

4.1. Методологические подходы

Российская школа испытаний горнопроходческого оборудования традиционно делает акцент на:

- натурных испытаниях в реальных горных выработках (при максимальной приближенности к реальности);
- использовании упрощенных аналитических моделей для расчета нагрузок;
- централизованной стендовой базе крупных заводов-изготовителей (КОРМЗ, ИЖ-КАРТЕКС и др.).

В последние годы российские исследователи все больше внимания уделяют методам масштабного моделирования с использованием 3D-печати, что позволяет сократить цикл «разработка – испытания – доработка» [1, 4].

Зарубежная школа (представленная работами из Финляндии, Китая и других стран) характеризуется:

- широким внедрением методов взаимного нагружения для энергоэффективных испытаний;
- использованием специализированных программно-аппаратных комплексов с высокой степенью автоматизации (например, Pulsar-7) [3];
- интеграцией стендовых испытаний с цифровыми двойниками машин [3];
- применением замкнутых гидравлических и электромеханических систем с рекуперацией энергии.

4.2. Конструктивные особенности

Сравнение конструктивных решений представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение конструктивных особенностей испытательных стендов

Table 1. Comparison of design features of test benches

Признак	Российские стенды	Зарубежные стенды
Привод нагружения	Преимущественно гидравлический или электромеханический с тиристорным управлением [8, 9]	Электромеханический с транзисторными преобразователями и ШИМ-управлением [3]
Система энергосбережения	Ограниченное применение (редко)	Метод взаимного нагружения (рекуперация энергии) — стандарт [3]
Средства измерений	Аналоговые и цифровые, часто разрозненные	Интегрированные цифровые системы с синхронизацией параметров [3, 7]
Автоматизация	Частичная автоматизация отдельных операций	Полная автоматизация цикла испытаний с генерацией отчетов [3]
Модульность	Низкая (стенды заточены под конкретную модель)	Высокая (быстрая переналадка на разные типы оборудования) [3]

4.3. Примеры реализации стендов для испытаний режущего инструмента



Анализ методов и конструкций стендов для изучения процесса резания горных пород, представленный в работе Панишева и соавторов (2023), позволяет выделить несколько основных типов конструкций [5]:

- Линейные стенды – режущий инструмент перемещается поступательно относительно образца породы. Просты в реализации, но не полностью моделируют реальную кинематику (особенно для вращательных инструментов);
- Ротационные стенды – инструмент вращается, а подача осуществляется в радиальном или осевом направлении. Ближе к реальным условиям, но конструктивно сложнее;
- Стенды кольцевого резания – инструмент описывает окружность на поверхности образца. Позволяют проводить длительные испытания на одном образце.

4.4. Эволюция подходов к испытаниям геоходов

В таблице 2 представлена хронология развития стендовых испытаний геоходов и ВПА.

Таблица 2. Эволюция стендовых испытаний геоходов

Table 2. Evolution of test bench testing for geohods

Период	Объект испытаний	Тип стенда	Ключевые результаты	Недостатки
Середина 1980-х	ВПА «ЭЛАНГ-3»	Натурный (фрагмент)	Доказательство работоспособности концепции	Высокая стоимость, трудозатратность [1]
2016 г.	Геоход «401» (D=3,2 м)	Полномасштабный стендовый	Движение в стенде, работа всех систем	Неудовлетворительная АСУ, крупногабаритная энергосистема [1]
2020 г.	Геоход D=0,63 м	Стенд из фундаментальных блоков с песком	Подтверждение концепции в уменьшенном масштабе	Сложность расчета крепости среды, низкая гибкость [1, 6]
2025 г. (проект)	Масштабные модели (3D-печать)	Лабораторный стенд (в разработке)	Планируется повышение точности и наглядности	Проектная стадия, требуется валидация [1, 4]

5. Требования к современным испытательным стендам

На основе проведенного анализа можно сформулировать комплекс требований к современным испытательным стендам горнопроходческого оборудования.

5.1. Диагностика, послеремонтные испытания и технические требования

Помимо испытаний новых образцов, стенды применяются для послеремонтных проверок оборудования. Для обеспечения высокого качества ремонта и уменьшения вероятности поломки все электрические машины должны проходить испытания под нагрузкой. Существующие методы механического агрегирования с нагрузочными устройствами сложно реализовать для крупных машин в условиях ремонтных предприятий, поэтому перспективным является метод статического нагружения. Этот метод включает этапы статического нагружения, когда машина подвергается нагрузке в статическом режиме, и динамического нагружения в режимах, приближенных к эксплуатационным [12]. Это позволяет выявить потенциальные поломки (или предпосылки поломок) еще на этапе ремонта. При этом:

- 1) Диапазон нагрузок должен перекрывать эксплуатационные значения с запасом не менее 20% для учета пиковых перегрузок.
- 2) Точность поддержания параметров: отклонение нагрузки не более $\pm 2\%$ от заданной, отклонение скорости не более $\pm 1\%$.



3) Быстродействие системы управления: время реакции на изменение режима не более 100 мс для адекватного воспроизведения динамических процессов.

4) Синхронизация измерений: погрешность привязки данных от разных датчиков не более 10 мс.

5) Регистрация параметров: частота опроса датчиков не менее 1 кГц для корректного анализа переходных процессов.

5.2. Требования к геосреде

Для стендов, моделирующих взаимодействие с породным массивом, важнейшими требованиями являются [1, 6]:

- 1) Воспроизводимость свойств – возможность многократного создания среды с одинаковыми параметрами (плотность, влажность, прочность).
- 2) Управляемость – возможность оперативного (в течение часов, а не дней) изменения параметров среды.
- 3) Прозрачность – возможность визуализации процесса взаимодействия (при использовании оптически прозрачных эквивалентов или специальных методик визуализации).
- 4) Стабильность – сохранение свойств в течение всего цикла испытаний (не менее 100 часов непрерывной работы).

5.3. Требования к информационно-измерительной системе

Современный испытательный стенд должен быть оснащен целым рядом датчиков [3, 7], требования к которым приведены в таблице 3.

Таблица 3. Требования к измерительным датчикам, размещаемым на испытательных стендах
Table 3. Requirements for measurement sensors installed on test benches

Считываемые показатели	Параметры	Требуемая точность
Силы и моменты	Усилия резания, крутящий момент, осевое усилие	$\pm 0,5\%$
Давление	Давление в гидросистеме	$\pm 0,25\%$
Перемещение и скорость	Подача, скорость вращения	$\pm 0,1$ мм, $\pm 0,1\%$
Температура	Нагрев узлов, температура рабочей жидкости	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
Вибрация	Вибрация узлов	$\pm 5\%$
Электрические параметры	Ток, напряжение, мощность	$\pm 1\%$

5.4. Системы управления и программное обеспечение

Совершенствование методов испытаний требует автоматизации процесса, что делает актуальной задачу выбора эффективных методов разработки стендов в сжатые сроки. Анализ существующих систем управления показывает важность специализированного программного обеспечения (ПО) для контроля за ходом испытаний. Автоматизация позволяет оценивать реакцию образца на заданный вид и величину нагрузки по определенным параметрам, что способствует выявлению скрытых ошибок проектирования [4]. Преимущества стендовых испытаний перед полевыми заключаются в возможности многократного повторения экспериментов, снижении затрат и постоянном контроле за ходом исследований [11].

Система управления и ПО испытательного стенда должна обеспечивать [3]:

- а) Создание и редактирование программ испытаний (библиотека типовых режимов);
- б) Автоматическое проведение испытаний по заданной программе;
- в) Мониторинг параметров в реальном времени с визуализацией;
- г) Аварийную остановку при превышении предельных значений;
- д) Автоматическую генерацию протоколов испытаний;



- е) Хранение и архивацию результатов с возможностью последующего анализа;
- ж) Интеграцию с CAD/CAE системами для сравнения расчетных и экспериментальных данных.

6. Перспективные направления развития

6.1. Применение аддитивных технологий

Одним из наиболее перспективных направлений является использование 3D-печати для изготовления масштабных моделей испытываемых узлов. Как отмечают Аксенов В.В. и соавторы, это позволяет [1, 4]:

- сократить время изготовления моделей с месяцев до дней;
- оперативно вносить изменения в конструкцию между сериями испытаний;
- изготавливать сложные внутренние полости и каналы, не реализуемые традиционными методами;
- снизить стоимость прототипирования на порядок.

6.2. Комбинирование физических и виртуальных испытаний

Перспективным является подход, при котором стендовые испытания проводятся в связке с цифровыми двойниками. Натурный стенд используется для валидации математических моделей, после чего основная оптимизация ведется в виртуальной среде, что кратно ускоряет процесс разработки [1, 3].

6.3. Развитие энергоэффективных стендов

Метод взаимного нагружения (замкнутого контура мощности), активно применяемый в зарубежных стендах, постепенно внедряется и в России. При испытаниях мощных трансмиссий это позволяет экономить до 80-90% электроэнергии по сравнению с разомкнутыми схемами нагружения [3].

6.4. Универсализация стендовой базы

Вместо создания специализированных стендов под каждую модель оборудования, современная тенденция – разработка универсальных модульных стендов с быстроменяемыми оснастками и адаптируемым программным обеспечением. Это снижает капитальные затраты и повышает загрузку оборудования [3].

7. Сравнительные характеристики стендов и стендовых испытаний

Поскольку масштабность измерений, проводимых с помощью стендов, различна, то требования к их созданию, оснащению и применению также различны.

В таблице 4 приведены различия между полноразмерными, масштабными стендами и цифровыми двойниками изделий.

В таблицах 5 и 6 приведены основные различия в подходах к созданию и использованию стендов для испытаний в Российской Федерации и за рубежом.

Следует отметить, что упор в приоритетных направлениях испытаний новой техники в РФ направлен на натурные испытания. Такой подход, несмотря на сложности в реализации, позволяет быстро выявлять «узкие» места в конструкции и особенностях применения агрегатов в реальных условиях. При этом устранение выявленных недостатков осуществляется по экстраполяции траектории от расчетных значений к реально выявленным. Такой подход позволяет очень быстро доводить новую технику до требуемого уровня надежности и долговечности, учитывая при этом особенности как внешней среды, с которой она взаимодействует, так и особенностей ее конструкции.



Таблица 4. Сравнение типов испытательных стендов по основным характеристикам
Table 4. Comparison of test bench types by key characteristics

Параметр	Полномасштабный стенд	Масштабный стенд	Цифровые двойники
Степень соответствия реальным условиям	Высокая	Средняя (требуется масштабирование)	Низкая (упрощенные модели среды)
Стоимость создания	Очень высокая (миллионы – десятки миллионов руб.)	Низкая (сотни тысяч – миллион руб.)	Средняя (стоимость ПО и рабочих станций)
Время изготовления	Годы	Месяцы	Дни–недели (на создание модели)
Гибкость изменений	Низкая (изменения требуют перестройки)	Высокая (быстрая замена моделей)	Очень высокая (изменение параметров модели)
Наглядность процессов	Ограниченная	Высокая (возможность визуализации)	Ограниченная (требуется рендеринг)
Возможность регистрации данных	Ограниченная	Высокая (легкая установка датчиков)	Неограниченная (программная)
Применение 3D-печати	Нецелесообразно	Оптимально	Не требуется
Типичные задачи	Сертификационные испытания, приемочные испытания	Поисковые исследования, оптимизация	Предварительная оценка, параметрические исследования

Таблица 5. Сравнение национальных подходов к испытаниям техники
Table 5. Comparison of national approaches to equipment testing

Характеристика	Российский подход	Зарубежный подход (Европа, Китай)
Приоритетный тип испытаний	Натурные испытания в реальных условиях	Стендовые испытания с высоким уровнем автоматизации
Степень автоматизации	Средняя (частичная автоматизация)	Высокая (полная автоматизация цикла)
Использование рекуперации энергии	Ограниченное	Широкое (метод взаимного нагружения) [3]
Интеграция с цифровыми двойниками	Начальный уровень	Высокий уровень [3]
Применение 3D-печати для прототипов	Развивается	Активно применяется
Нормативная база	ГОСТы, отраслевые стандарты	ISO, международные стандарты
Типовая элементная база	Тиристорные преобразователи	Транзисторные преобразователи с ШИМ [3]



Таблица 6. Сводная характеристика рассмотренных испытательных стендов

Table 6. Summary characteristics of the test benches discussed

Источник	Тип оборудования	Год разработки	Страна	Ключевая особенность	Статус
Авторское свидетельство №457798	Исполнительные органы проходческих машин	1973	СССР	Изменяемый угол наклона оси	Реализован [8]
Труды ЛГИ, Т.94	Электромеханические стенды	1982	СССР	Нагрузочные и воспроизводящие стенды	Реализованы [9]
Аксенов и др. (2025)	Геолоды (масштабные модели)	2025	Россия	3D-печать моделей, управляемая геосреда	Проект [1, 4]
«Горные науки и технологии» (2025)	Трансмиссии экскаваторов	2025	Россия	Метод взаимного нагружения, система Pulsar-7	Реализован [3]
Панишев и др. (2023)	Режущий инструмент	2023	Россия	Обзор методов и конструкций	Обзор [5]
Патент CN212723016 U	Высоковольтное испытательное оборудование	2020	Китай	Защита от короткого замыкания, многоуровневая блокировка	Реализован [2]
Dolores test bench	Гидравлические приводы	2020	Финляндия (Aalto University)	Антикавитационная система, комплексная датчиковая база	Реализован [7]

Заключение

Испытательные стенды являются неотъемлемой частью жизненного цикла горнопроходческого оборудования. Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что развитие стендовой базы идет по пути:

- перехода от полномасштабных натурных испытаний к масштабному лабораторному моделированию, что существенно снижает затраты и время разработки;
- внедрения автоматизированных информационно-измерительных систем с возможностью автоматической генерации отчетов и интеграции с цифровыми двойниками;
- применения энергоэффективных методов нагружения (замкнутый контур мощности), обеспечивающих рекуперацию энергии при испытаниях мощных трансмиссий;
- использования аддитивных технологий для быстрого прототипирования масштабных моделей испытываемых узлов;
- разработки универсальных модульных стендов, позволяющих проводить испытания широкой номенклатуры оборудования при минимальной переналадке.

Российские исследователи (Кузбасский государственный технический университет, Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, НИТУ МИСИС) активно работают в этом направлении, что подтверждается публикациями последних лет [1, 3, 4]. Разработка и создание современных испытательных стендов является важнейшим условием ускорения импортозамещения и повышения конкурентоспособности отечественной горной техники.

Развитие испытательной базы горнопроходческого оборудования требует перехода от натурных испытаний к комплексным лабораторным стендам с использованием масштабных моделей [1]. Внедрение современных систем управления и энергоэффективных нагружающих



устройств позволяет повысить достоверность экспериментальных данных [4, 11]. Такой подход не только оптимизирует процесс проектирования новых аппаратов, но и обеспечивает надежную диагностику технического состояния существующей техники, минимизируя аварийные отказы [6].

Необходимость создания специализированных лабораторных стендов для испытаний масштабных моделей горнопроходческой техники, в частности геоходов, представляет собой ответ на вызовы современного этапа освоения подземного пространства. Актуальность данного подхода обусловлена ограниченностью традиционных методов оценки поведения техники в реальных горногеологических условиях. Анализ существующих данных позволяет выделить ряд аргументов как в поддержку разработки подобных стендов, так и указывающих на их потенциальные ограничения и сложности внедрения.

Создание испытательных стендов необходимо из-за того, что:

- 1) современные методы компьютерного моделирования, несмотря на их доступность и распространенность, не обеспечивают полноценной достоверности при воспроизведении реальных условий. Численные модели часто опираются на упрощенные представления о геосреде, игнорируя ее фундаментальную неоднородность, наличие включений различной прочности и изменчивость физикомеханических свойств. Это приводит к неполной картине взаимодействия исполнительных органов техники с забоем [1];
- 2) натурные и полномасштабные стендовые испытания полноразмерных образцов, хотя и дают точные данные, связаны с колоссальными временными, трудовыми и финансовыми затратами. История испытаний, начиная с винтоповоротных проходческих агрегатов и заканчивая современными геоходами, демонстрирует, что такие эксперименты экономически неэффективны для этапной отладки конструкций [1];
- 3) применение масштабных моделей в сочетании с управляемой испытательной средой позволяет значительно повысить информативность данных при снижении затрат на создание прототипов. Использование технологий трехмерной печати для изготовления таких моделей обеспечивает гибкость, оперативность и экономическую выгоду по сравнению с производством рабочих прототипов [1];
- 4) создание такого технологического уклада, аналогичного полигонам в авиастроении, является ключевым элементом для ускорения проектирования и повышения конкурентоспособности отечественной горной техники [1].

В то же время, существуют факторы риска, связанные с реализацией концепции лабораторных стендов для масштабных моделей:

- 1) невозможность поддержания требуемой стабильности геосреды в искусственных условиях стенда [1]. Геологическая среда в натуральных условиях обладает сложной структурой, которую трудно воссоздать с достаточной точностью в лабораторном объеме;
- 2) высокая стоимость и сложность самого процесса строительства подобных стендов, требующих значительных ресурсов [1];
- 3) сложность расчета итоговых показателей крепости испытательной среды; погрешности, вызванные взаимодействием элементов стенда и заполняющего объема геосреды (эквивалента), могут существенно искажать результаты испытаний [1];
- 4) невозможность оперативного внесения изменений в испытательную среду и оперативной замены испытуемых элементов, что снижает гибкость исследований по сравнению с компьютерным моделированием [1];
- 5) существует проблема масштабного эффекта: механические свойства зависят от масштаба рассмотрения массива, и переход от лабораторных образцов к натурным аппаратам требует тщательного учета этих различий, чтобы исключить влияние размерности на конечный результат [13], [14];



- б) сложность производства элементов масштабных моделей и отсутствие должной регистрации данных как со стороны образца, так и со стороны среды также усложняют процесс валидации физических моделей [1].

Необходимость создания стендов для испытаний масштабных моделей геоходов имеет под собой прочное обоснование в виде недостатков как чистого компьютерного моделирования, так и натурных испытаний полноразмерной техники. Аргументы за внедрение данной технологии включают экономическую эффективность, оперативность заготовки моделей и возможность детального анализа взаимодействия узлов со средой. Однако аргументы против указывают на технологические барьеры: проблемы со стабильностью искусственной геосреды, сложность расчетов крепостных характеристик, высокую стоимость строительства стендов и влияние масштабного эффекта. Следовательно, предложенное направление является перспективным, но требует тщательной проработки инженерных решений по минимизации погрешностей, связанных с искусственным воссозданием геологических условий, чтобы обеспечить сопоставимость лабораторных данных с реальными эксплуатационными характеристиками горнопроходческого оборудования.

Будущее горнопроходческого оборудования лежит в плоскости **комплексных лабораторных испытаний**. Отказ в пользу простых компьютерных симуляций или слишком дорогих натурных экспериментов в пользу умных стендов с масштабными моделями и автоматизированным управлением позволит:

- ускорить проектирование новых машин;
- снизить затраты на их разработку;
- повысить надежность техники в сложных условиях;
- обеспечить качественный ремонт и диагностику существующего парка оборудования.

Таким образом, развитие испытательной базы становится ключевым фактором для безопасного и эффективного освоения подземного пространства.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Хорешок Алексей Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры горных машин и комплексов; ведущий научный сотрудник лаборатории техногенных процессов
e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

Аксенов Владимир Валерьевич, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории техногенных процессов
e-mail: 55vva42@mail.ru

Кузнецов Владимир Всеволодович, к.т.н., доцент кафедры горных машин и комплексов; ведущий научный сотрудник лаборатории техногенных процессов
e-mail: jenixov3@mail.ru

Марков Сергей Олегович, к.т.н., доцент кафедры открытых горных работ; ведущий научный сотрудник лаборатории техногенных процессов
e-mail: markovso@kuzstu.ru

Тюленев Максим Анатольевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой открытых горных работ; ведущий научный сотрудник лаборатории техногенных процессов
e-mail: tma.geolog@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Российская Федерация, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28



Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 650010, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10

Список литературы

1. Аксенов В.В., Буялич Г.Д., Пашков Д.А., Романов Ю.А., Мягких И.Д. Обоснование необходимости создания стендов для испытаний моделей геохода // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 5 (181). С. 81-87. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-81-87.
2. Mining high-voltage test power supply. Patent CN212723016U. China. 2020.
3. Мехатронная система для обкатки и испытаний механических передач карьерных экскаваторов / С. И. Малафеев, А. А. Малафеева, В. И. Коняшин, А. А. Новгородов // Горные науки и технологии. – 2025. – Т. 10, № 1. – С. 75-83. – DOI 10.17073/2500-0632-2024-05-262.
4. Обзор систем управления испытательным стендом / В. П. Федичкина, V. P. Fedichkina, К. С. Талызина [и др.] // Молодой исследователь Дона. – 2025. – № 2 (53). – С. 72-76.
5. Анализ методик и конструкций стендов для исследования процесса резания пород различными типами рабочих органов горного оборудования / С. В. Панишев, Е. Л. Алькова, М. С. Максимов, Д. В. Хосоев // Горная промышленность. – 2023. – № 6. – С. 103-108. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-6-103-108.
6. Герики, П.Б. Новое в методике проведения испытаний энерго-механического оборудования горной техники / П.Б. Герики // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 3. – С. 126-134
7. Dolores test bench. Hydraulic systems testing // Gulf Hydraulics FZE : сайт. URL : <https://testing25.gulfh.com/custom-made-hydraulic-systems/hydraulic-test-benches> (дата обращения: 09.03.2026).
8. Полуянский С.А., Трусков И.В., Долгополов А.В., Дыдзинский В.В., Жолнач В.И. Стенд для исследования исполнительных органов проходческих машин. Авторское свидетельство СССР № 457798. 1975.
9. Рудаков В.В., Мартикайнен Р.П., Оранский Г.В. Электромеханические испытательные стенды // Записки Горного института. 1982. Т. 94. С. 3.
10. Создание проходческих подземных аппаратов, взаимодействующих с геосредой. области исследований / В. В. Аксенов, В. Ю. Бегляков [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 2 (148). – С. 3-12.
11. Тодарев, В.В. Нагружающее устройство комплексных испытательных стендов / В. В. Тодарев, В. А. Савельев, И. В. Дорошенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О.Сухого. – 2022. – № 3. – С. 81-87.
12. Сорокин, А.В. Послеремонтные испытания электрических машин шагающих экскаваторов / А. В. Сорокин // Науки о Земле и недропользование. – 2020. – № 1. – С. 103-110.
13. Протосеня, А.Г. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива / А.Г. Протосеня, П.Э.Пербило // Записки Горного института. – 2017. – № 223. – С. 51-57.
14. Протосеня, А.Г. Оценка прочности блочного горного массива методом численного моделирования / А.Г. Протосеня, П.Э. Вербило // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – № 4. – С. 47-54.
15. Принципы построения испытательных стендов / В. С. Захаренко, В. А. Савельев // Современные проблемы машиноведения : Материалы международной научно-технической конференции (научных чтений, посвященных П. О. Сухому), Гомель, 01–03 июля 1998 года / Белорусская инженерная академия, Гомельский политехнический институт им. П.О. Сухого, АООТ "ОКБ Сухого". Том II. – Гомель: Гомельский политехнический институт им. П.О. Сухого, 1998. – С. 113-114.
16. Патент № 2414690 С1 Российская Федерация, МПК G01M 7/08. Стенд для испытаний объектов на знакопеременные ударные нагрузки : № 2009138696/28 : заявл. 19.10.2009 : опубл. 20.03.2011 / А. Е. Кияткин, Р. Н. Шакиров ; заявитель Российская Федерация.
17. Патент № 2477848 С2 Российская Федерация, МПК G01M 13/02. Нагружающее устройство для обкатки и испытания элементов машин : № 2010138922/28 : заявл. 21.09.2010 : опубл. 20.03.2013 / П. А. Власов ; заявитель ФГОУ ВПО «Пензенская государственная сельскохозяйственная академия».
18. Челпанов, И. Б. Автоматические технологические машины и оборудование. Испытания машин : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки и специальностям техники и технологий / И. Б. Челпанов ; И. Б. Челпанов ; Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2008. – 296 с. – ISBN 978-5-7422-1884-5.



19. Патент № 2089879 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Установка для испытания на износ материала рабочих органов почвообрабатывающей машины : № 95102430/28 : заявл. 23.02.1995 : опубл. 10.09.1997 / В. И. Пындак, Ю. Г. Лапынин, В. Л. Строков [и др.] ; заявитель Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия.
20. Патент № 2553123 С2 Российская Федерация, МПК G01M 7/00. Способ модернизации двухколонной универсальной испытательной машины с гидравлическим и механическим приводами : № 2013115321/03 : заявл. 05.04.2013 : опубл. 10.06.2015 / К. К. Нежданов, А. А. Игошин, С. А. Толушов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства».
21. Авторское свидетельство № 688614 А1 СССР, МПК E21C 27/22, G01M 19/00. Стенд для испытания исполнительного органа проходческого комбайна : № 2618929 : заявл. 18.05.1978 : опубл. 30.09.1979 / А. А. Алифов, К. К. Глухарев, И. Ф. Гончаревич [и др.] ; заявитель Государственный научно-исследовательский институт машиноведения им. академика А.А.Благоднарова.
22. Патент № 2649241 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Установка для испытания на абразивный износ рабочих органов почвообрабатывающих машин : № 2016148356 : заявл. 08.12.2016 : опубл. 30.03.2018 / В. И. Мясенко, Н. А. Маринов, А. С. Санкин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный сельскохозяйственный институт».
23. Патент № 2279050 С1 Российская Федерация, МПК G01M 19/00. стенд для исследования рабочих органов почвообрабатывающих машин, предпочтительно глубокихрыхлителей и щелерезов : № 2005107497/28 : заявл. 17.03.2005 : опубл. 27.06.2006 / А. М. Салдаев ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия».
24. Титова, И. И. Стенд для обкатки узлов и агрегатов машин / И. И. Титова // Цифровые и инженерные технологии в АПК : Материалы Национальной научно-практической конференции, Майский, 25 ноября 2021 года / Председатель оргкомитета: Стребков С.В. Заместитель председателя Голованова Е. В. Члены оргкомитета: Водолазская Н. В. Ломазов В.А. Миронов А.Л. – Майский: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2022. – С. 73-75.
25. Патент № 2661453 С1 Российская Федерация, МПК G01M 7/02. Устройство крепления электромагнитных реле на вибростенде и ударном стенде : № 2017124196 : заявл. 07.07.2017 : опубл. 16.07.2018 / Ю. Н. Черкасов, В. В. Ракитянский, Л. М. Клячко, В. В. Черносвитов.
26. Определение энергии ударных импульсов в процессе измельчения горных пород для мельниц различных типов / Ю. В. Дмитрак, В. А. Атрушкевич, С. С. Кубрин, Л. С. Адамова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, № 3(53). – С. 468-478. – DOI 10.21177/1998-4502-2022-14-3-468-478.
27. Патент № 2750002 С1 Российская Федерация, МПК B02C 19/16. Вибрационная мельница : № 2020136023 : заявл. 02.11.2020 : опубл. 21.06.2021 / В. В. Сергеев, Т. Е. Герасименко, Ю. В. Дмитрак ; заявитель ФГБОУ ВО Северо-Кавказский горно-металлургический институт государственный технологический университет.
28. Дмитрак, Ю. В. Определение коэффициента демпфирования ударного импульса при измельчении горных пород / Ю. В. Дмитрак, В. А. Атрушкевич, Л. С. Адамова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, № 4(54). – С. 702-710. – DOI 10.21177/1998-4502-2022-14-4-702-710.
29. Патент № 2585482 С1 Российская Федерация, МПК G01L 3/00. Устройство для измерения крутящего момента, скорости вращения вала и мощности на валу : № 2015110018/28 : заявл. 20.03.2015 : опубл. 27.05.2016 / В. А. Халюткин, В. А. Алексеенко, А. П. Ульянов, П. С. Красов ; заявитель ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет».
30. Авторское свидетельство № 1105635 А1 СССР, МПК E21C 27/00. Испытательный стенд для горных машин : № 3583738 : заявл. 27.04.1983 : опубл. 30.07.1984 / Л. А. Серов, Ю. Н. Панькин, Е. А. Чекрышов ; заявитель Подмосковский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт.
31. Стенд испытательный / М. Г. Киселев, В. Л. Габез, Г. А. Есьман, Д. Р. Шарков // Приборостроение - 2014 : материалы 7-й Международной научно-технической конференции, Минск, 19–21 ноября 2014 года. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2014. – С. 311-313.
32. Патент на полезную модель № 31449 U1 Российская Федерация, МПК G01M 7/00. Ударный испытательный стенд : № 2003106654/20 : заявл. 12.03.2003 : опубл. 10.08.2003 / Б. Л. Штриков, В. Г. Шуваев, В. А. Папшев [и др.] ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Самарский государственный технический университет.



33. Патент № 2133389 С1 Российская Федерация, МПК F15B 19/00. гидроприводной стенд : № 97114200/06 : заявл. 06.08.1997 : опубл. 20.07.1999 / Г. М. Иванов, В. К. Свешников, Л. С. Столбов [и др.] ; заявитель ТОО «Научно-производственное предприятие Энимс-Интергидропривод».
34. Анодин, А. М. Алгоритмическое, аппаратное и программное обеспечение системы управления стенда гидравлических испытаний / А. М. Анодин, В. В. Бодров, А. А. Носенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2006. – № 14(69). – С. 46-48.
35. Патент на полезную модель № U 6504, МПК G01B 7/00, F15B 9/00. Датчик перемещения для гидравлических систем : № u 20091061 : заявл. 16.12.2009 / В. А. Карпов, А. В. Ковалев, Д. А. Литвинов ; заявитель Гомельский приборостроительный завод.
36. Патент № 2755376 С1 Российская Федерация, МПК F15B 19/00. Стенд для испытания гидроприводов высокого давления прямолинейного возвратно-поступательного движения : № 2021102588 : заявл. 04.02.2021 : опубл. 15.09.2021 / Н. И. Александров, П. Л. Лямин, В. В. Петухов, С. Н. Фомин ; заявитель Акционерное общество «Центр технологии судостроения и судоремонта».
37. Авторское свидетельство № 1661482 А1 СССР, МПК F15B 19/00. Стенд для динамических испытаний гидросистем : № 4672499 : заявл. 01.04.1989 : опубл. 07.07.1991 / В. П. Грачев, В. И. Дылев ; заявитель Научно-производственное объединение по кузнечно-прессовому оборудованию и гибким производственным системам для обработки давлением.
38. Бабин, Н. Н. Стенд для обкатки и испытания гидромеханических трансмиссий / Н. Н. Бабин, П. М. Телешов, М. В. Сваталов // Ремонт автомобильной техники : Методические рекомендации. Выпуск 58. – Рязань : Военная академия тыла и транспорта, 1988. – С. 44-46.
39. Стендовое оборудование для испытания трансмиссий с замыканием силового контура кривошипными механизмами / В. В. Шеховцов, И. В. Ходес, В. П. Шевчук [и др.] // Техника машиностроения. – 2012. – № 3(83). – С. 5-11.
40. Инвариантный электромеханический стенд испытания трансмиссий / В. И. Луковников, С. И. Захаренко, В. С. Захаренко, В. А. Савельев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 1999. – № 1. – С. 33-37.
41. Ефимов, С. Н. Улучшение эксплуатационных показателей зубчатых передач приводов специальной техники : монография / С. Н. Ефимов. – Красноярск : Сибирский юридический институт ФСКН России, 2002. – 103 с.
42. Авторское свидетельство № 1578556 А1 СССР, МПК H02P 5/46, G01M 13/02. Стенд для испытания трансмиссий : № 4363948 : заявл. 18.01.1988 : опубл. 15.07.1990 / А. Г. Иванов, Л. В. Кручинин, Б. К. Никитин ; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизированному электроприводу в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте.
43. Ефременков, А. Б. Разработка научных основ создания систем геохода : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ефременков Андрей Борисович. – Кемерово, 2016. – 314 с.
44. Ананьев, К. А. Создание исполнительного органа геохода для разрушения пород средней крепости : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ананьев Кирилл Алексеевич. – Кемерово, 2016. – 144 с.
45. Ермаков, А. Н. Обоснование параметров законтурных исполнительных органов геоходов для разрушения пород средней крепости : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ермаков Александр Николаевич. – Кемерово, 2016. – 158 с.
46. Габов, В.В. Стенды для исследования процесса резания угля и калийной соли одиночным резцом горных машин / В.В. Габов, Д.А. Задков, Ю.В. Лыков, Э.В. Кустриков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 6. – С. 128-134.
47. Carbonell, J.M. Modelling of tunnelling processes and rock cutting tool wear with the particle finite element method / J.M. Carbonell, E. Oñate, B. Suárez // Computational Mechanics. – 2013. – Vol. 52, № 3. – P. 607–629.
48. Дронов, А. А. Обоснование параметров узла сопряжения секций геохода : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дронов Антон Анатольевич. – Кемерово, 2020. – 169 с.
49. Нозирзода, Ш. С. Обоснование рациональных параметров ножевых исполнительных органов с учетом эксплуатационных требований при создании геохода : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нозирзода Шодмон Салохидин. – Великий Новгород, 2025. – 168 с.



50. Пашков, Д. Обоснование силовых и энергетических параметров исполнительных органов геохода для разрушения мягких пород : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пашков Дмитрий. – Кемерово, 2021. – 176 с.

UDC 620.1.05:622.267

AN OVERVIEW OF GEOKHOD TEST BENCHES: CURRENT STATUS AND FUTURE PROSPECTS

Alexey A. Khoreshok¹, Vladimir V. Aksenov¹, Vladimir V. Kuznetsov¹,
Sergey O. Markov^{1,2}, Maxim A. Tyulenev¹

¹ Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University



Article info

Received:
06 April 2026

Revised:
05 June 2026

Accepted:
15 June 2026

Keywords: geokhod, test bench, mining equipment, mining and geological conditions, geotechnology, physical and mechanical properties, automation, underground mining, geo-environment, executive body

Abstract.

The significance of this research stems from the critical gap between the accuracy of computer modeling and the resource-intensive nature of full-scale testing. Traditional approaches do not account for the stochastic nature of the geomedia, which reduces the validity of predictions regarding equipment behavior. The research focuses on addressing the problem of scale effects during the transition from laboratory models to full-scale prototypes. The key variables are the scaling factor, the rheological properties of the artificial geomedia, and the dynamic characteristics of the loading devices. The methodology involves conducting a series of controlled experiments using physical models fabricated using additive manufacturing technologies, followed by verification of the data against the results of numerical simulations. Expected results include the development of methodological recommendations for creating a test environment, which will improve the reliability of predicting the operational characteristics of mining equipment, reduce the time and cost of developing new classes of tunneling machines, and provide a reliable basis for diagnosing the technical condition of equipment during post-repair testing.

The purpose of this review is to systematize and analyze existing designs and methods for bench testing of mining tunneling equipment, identify their advantages and disadvantages, and determine promising directions for the development of bench testing facilities based on Russian and foreign sources.

For citation Khoreshok A.A., Aksenov V.V., Kuznetsov V.V., Markov S.O., Tyulenev M.A. An overview of geokhod test benches: current status and future prospects. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2026;2(33):31-58. DOI: 10.26730/2618-7434-2026-2-31-58, EDN: AQUOFX

The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2026-0001 «Development of integrated geotechnologies for coal mining in complex mining and geological conditions without the constant presence of people in the mining areas, as well as methods for improving the operational efficiency and monitoring the technical condition of robotic equipment» (Reg. No. 1023032000051-1-1.5.1;2.7.5).

References

1. Aksenov, V.V., Buyalich, G.D., Pashkov, D.A., Romanov, Yu.A., and Myagkikh, I.D. Justification for the Need to Develop Test Benches for Mining Vehicle Models. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2025;5(181):81–87. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-81-87. [In Russ.].



2. Mining high-voltage test power supply. Patent CN212723016U. China. 2020.
3. Mechatronic System for Running-In and Testing Mechanical Transmissions of Open-Pit Excavators / S. I. Malafeev, A. A. Malafeeva, V. I. Konyashin, A. A. Novgorodov. *Mining Sciences and Technology*. 2025;10(1):75–83. – DOI 10.17073/2500-0632-2024-05-262. [In Russ.].
4. Overview of Test Bench Control Systems / V. P. Fedichkina, V. P. Fedichkina, K. S. Talyzina [et al.] *Young Researcher of the Don*. 2025;2(53):72-76. [In Russ.].
5. Analysis of Methods and Designs of Test Benches for Studying the Rock Cutting Process Using Various Types of Mining Equipment Cutting Tools / S. V. Panishev, E. L. Alkova, M. S. Maksimov, D. V. Khosoev. *Mining Industry*. 2023;6:103-108. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-6-103-108. [In Russ.].
6. Gerike, P. B. New Developments in Testing Methods for Energy-Mechanical Mining Equipment. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 2017;3:126–134. [In Russ.].
7. Dolores Test Bench. Hydraulic Systems Testing // Gulf Hydraulics FZE: website. URL: <https://testing25.gulfh.com/custom-made-hydraulic-systems/hydraulic-test-benches> (accessed March 9 2026).
8. Poluyansky, S.A., Truskov, I.V., Dolgoplov, A.V., Dydzinsky, V.V., Zholnach, V.I. Test stand for studying the actuators of tunneling machines. USSR Author's Certificate No. 457798. 1975. [In Russ.].
9. Rudakov, V.V., Martikainen, R.P., Oransky, G.V. Electromechanical Test Benches. *Proceedings of the Mining Institute*. 1982;94:3. [In Russ.].
10. Development of Underground Tunneling Machines Interacting with the Geomedia: Research Areas / V. V. Aksenov, V. Yu. Beglyakov [et al.]. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2020;2(148):3-12. [In Russ.].
11. Todarev, V. V. Loading Device for Comprehensive Test Benches / V. V. Todarev, V. A. Savelyev, I. V. Doroshchenko. *Bulletin of the P. O. Sukhoi Gomel State Technical University*. 2022;3:81-87. [In Russ.].
12. Sorokin, A.V. Post-repair testing of electrical machines in walking excavators. *Earth Sciences and Subsurface Use*. 2020;1:103-110. [In Russ.].
13. Protosenia, A.G. Study of the Compressive Strength of a Fractured Rock Mass / A.G. Protosenia, P.E. Perbilo. *Proceedings of the Mining Institute*. 2017;223:51-57. [In Russ.].
14. Protosenya, A.G. Evaluation of the Strength of a Blocky Rock Mass Using Numerical Modeling / A.G. Protosenya, P.E. Verbito. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Mining Journal*. 2016;4:47-54. [In Russ.].
15. Principles of Test Bench Design / V. S. Zakharenko, V. A. Savelyev. In: *Contemporary Problems in Mechanical Engineering: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (Scientific Readings Dedicated to P. O. Sukhoi)*, Gomel, July 1–3, 1998 / Belarusian Engineering Academy, P. O. Sukhoi Gomel Polytechnic Institute, JSC “Sukhoi Design Bureau.” Vol. II. – Gomel: P. O. Sukhoi Gomel Polytechnic Institute, 1998. – pp. 113–114. [In Russ.].
16. Patent No. 2414690 C1 Russian Federation, IPC G01M 7/08. Test stand for subjecting objects to alternating shock loads: No. 2009138696/28: filed Oct. 19, 2009: published Mar. 20, 2011 / A. E. Kiyatkin, R. N. Shakirov; applicant: Russian Federation. [In Russ.].
17. Patent No. 2477848 C2 Russian Federation, IPC G01M 13/02. Loading device for running-in and testing machine components: No. 2010138922/28: filed Sept. 21, 2010: published Mar. 20, 2013 / P. A. Vlasov; applicant: Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Penza State Agricultural Academy.” [In Russ.].
18. Chelpanov, I. B. Automatic Process Machines and Equipment. Machine Testing: A Textbook for University Students Studying Engineering and Technology Fields and Specialties / I. B. Chelpanov; I. B. Chelpanov; St. Petersburg State Polytechnic University. – St. Petersburg: Polytechnic University Press, 2008. – 296 pp. – ISBN 978-5-7422-1884-5. [In Russ.].
19. Patent No. 2089879 C1, Russian Federation, IPC G01N 3/56. Apparatus for testing the wear resistance of working parts of a soil-tilling machine: No. 95102430/28: filed Feb. 23, 1995: published Sept. 10, 1997 / V. I. Pyndak, Yu. G. Lapyinin, V. L. Stokov [et al.]; applicant: Volgograd State Agricultural Academy. [In Russ.].
20. Patent No. 2553123 C2 Russian Federation, IPC G01M 7/00. Method for modernizing a two-column universal testing machine with hydraulic and mechanical drives: No. 2013115321/03: filed April 5, 2013: published June 10, 2015 / K. K. Nezhdanov, A. A. Igoshin, S. A. Tolushov; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Penza State University of Architecture and Construction.” [In Russ.].
21. Author's Certificate No. 688614 A1 USSR, IPC E21C 27/22, G01M 19/00. Test stand for testing the working mechanism of a tunnel boring machine: No. 2618929: filed May 18, 1978: published Sept. 30, 1979 / A. A. Alifov, K. K. Glukharev, I. F. Goncharevich [et al.]; Applicant: Academician A. A. Blagonravov State Research Institute of Mechanical Engineering. [In Russ.].
22. Patent No. 2649241 C1, Russian Federation, IPC G01N 3/56. Apparatus for Testing the Abrasive Wear of Working Parts of Soil-Tilling Machines: No. 2016148356: filed Dec. 8, 2016: published Mar. 30, 2018 / V. I. Myalenko, N. A. Marinov, A. S. Sankin [et al.]; Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kemerovo State Agricultural Institute.”
23. Patent No. 2279050 C1 Russian Federation, IPC G01M 19/00. Test stand for studying the working parts of soil-tilling machines, preferably deep cultivators and furrow openers: No. 2005107497/28: filed March 17, 2005: published June 27, 2006 / A. M. Saldaev; applicant: Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Volgograd State Agricultural Academy.” [In Russ.].



24. Titova, I. I. Test bench for running in machine components and assemblies. In: *Digital and Engineering Technologies in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference*, Maitsky, November 25, 2021. V.Y. Gorin Belgorod State Agrarian University, 2022. – pp. 73-75. [In Russ.].
25. Patent No. 2661453 C1, Russian Federation, IPC G01M 7/02. Device for Mounting Electromagnetic Relays on a Vibration Test Stand and an Impact Test Stand: No. 2017124196: filed July 7, 2017: published July 16, 2018 / Yu. N. Cherkasov, V. V. Rakityansky, L. M. Klyachko, V. V. Chernosvitov. [In Russ.].
26. Determination of Impact Pulse Energy During Rock Crushing for Various Types of Mills / Yu. V. Dmitrak, V. A. Atrushkevich, S. S. Kubrin, L. S. Adamova. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(3):468-478. – DOI 10.21177/1998-4502-2022-14-3-468-478. [In Russ.].
27. Patent No. 2750002 C1 Russian Federation, IPC B02C 19/16. Vibrating mill: No. 2020136023: filed Nov. 2, 2020: published June 21, 2021 / V. V. Sergeev, T. E. Gerasimenko, Yu. V. Dmitrak; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education North Caucasus Mining and Metallurgical Institute, State Technological University. [In Russ.].
28. Dmitrak, Yu. V. Determination of the Shock Impulse Damping Coefficient During Rock Crushing / Yu. V. Dmitrak, V. A. Atrushkevich, L. S. Adamova. *Sustainable Development of Mountain Territories*. – 2022;14(4):702-710. – DOI 10.21177/1998-4502-2022-14-4-702-710. [In Russ.].
29. Patent No. 2585482 C1 Russian Federation, IPC G01L 3/00. Device for measuring torque, shaft rotational speed, and shaft power: No. 2015110018/28: filed March 20, 2015: published May 27, 2016 / V. A. Khalyutkin, V. A. Alekseenko, A. P. Ulyanov, P. S. Krasov; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Stavropol State Agrarian University.” [In Russ.].
30. Author's Certificate No. 1105635 A1 of the USSR, IPC E21C 27/00. Test bench for mining machines: No. 3583738: filed April 27, 1983: published July 30, 1984 / L. A. Serov, Yu. N. Pankin, E. A. Chekryzhov; applicant: Moscow Region Scientific Research and Design Institute of Coal. [In Russ.].
31. Test stand / M. G. Kiselev, V. L. Gabets, G. A. Esman, D. R. Sharkov // *Instrument Engineering – 2014: Proceedings of the 7th International Scientific and Technical Conference*, Minsk, November 19–21, 2014. – Minsk: Belarusian National Technical University, 2014. – pp. 311-313. [In Russ.].
32. Utility Model Patent No. 31449 U1, Russian Federation, IPC G01M 7/00. Impact Test Bench: No. 2003106654/20: filed March 12, 2003: published August 10, 2003 / B. L. Shtrikov, V. G. Shuvaev, V. A. Papshev [et al.]; applicant: Samara State Technical University, a State Educational Institution of Higher Professional Education. [In Russ.].
33. Patent No. 2133389 C1 Russian Federation, IPC F15B 19/00. Hydraulic drive test bench: No. 97114200/06: filed Aug. 6, 1997: published July 20, 1999 / G. M. Ivanov, V. K. Sveshnikov, L. S. Stolbov [et al.]; applicant: Enims-Intergidroprivod Scientific and Production Enterprise LLP. [In Russ.].
34. Anodin A.M., Bodrov V.V., Nosenko A.A. Algorithmic, Hardware, and Software Support for the Control System of a Hydraulic Test Bench. *Bulletin of South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, and Radio Electronics*. 2006;14(69):46-48. [In Russ.].
35. Utility Model Patent No. U 6504, IPC G01B 7/00, F15B 9/00. Displacement sensor for hydraulic systems: No. u 20091061: filed Dec. 16, 2009 / V. A. Karpov, A. V. Kovalev, D. A. Litvinov; applicant: Gomel Instrument-Making Plant. [In Russ.].
36. Patent No. 2755376 C1 Russian Federation, IPC F15B 19/00. Test bench for high-pressure hydraulic actuators with linear reciprocating motion: No. 2021102588: filed Feb. 4, 2021: published Sept. 15, 2021 / N. I. Aleksandrov, P. L. Lyamin, V. V. Petukhov, S. N. Fomin; applicant: Joint-Stock Company “Center for Shipbuilding and Ship Repair Technology.” [In Russ.].
37. Author's Certificate No. 1661482 A1 USSR, IPC F15B 19/00. Test bench for dynamic testing of hydraulic systems : No. 4672499 : filed April 1, 1989 : published July 7, 1991 / V. P. Grachev, V. I. Dylev; applicant: Scientific and Production Association for Forging and Pressing Equipment and Flexible Production Systems for Pressure Processing. [In Russ.].
38. Babin N. N. [et al.] Test bench for running-in and testing of hydromechanical transmissions. *Repair of Automotive Equipment: Methodological Recommendations. Issue 58*. – Ryazan: Military Academy of Logistics and Transport, 1988. – pp. 44–46. [In Russ.].
39. Shekhovtsov V.V. [et al.] Test bench equipment for testing transmissions with a power circuit closed by crank mechanisms. *Mechanical Engineering Technology*. 2012;3(83):5-11. [In Russ.].
40. Invariant Electromechanical Test Bench for Transmissions / V. I. Lukovnikov, S. I. Zakharenko, V. S. Zakharenko, V. A. Savelyev. *Energy. Proceedings of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS*. 1999;1:33-37. [In Russ.].
41. Efimov S.N. Improving the Operational Performance of Gear Transmissions in Special-Purpose Machinery. – Krasnoyarsk: Siberian Law Institute of the Federal Drug Control Service of Russia, 2002. – 103 pp. [In Russ.].
42. Author's Certificate No. 1578556 A1 USSR, IPC H02P 5/46, G01M 13/02. Test bench for transmissions: No. 4363948: filed Jan. 18, 1988: published July 15, 1990 / A. G. Ivanov, L. V. Kruchinin, B. K. Nikitin; applicant: All-Union Scientific Research and Design Institute for Automated Electric Drives in Industry, Agriculture, and Transportation. [In Russ.].



43. Efremkov, A. B. Development of the Scientific Foundations for the Creation of Geohod Systems: Specialty 05.05.06 "Mining Machinery": Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences. Kemerovo, 2016. – 314 pp. [In Russ.].
44. Ananyev, K. A. Development of a Geo-Tracker Actuator for Breaking Rock of Medium Strength: Specialty 05.05.06 "Mining Machinery": Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Kemerovo, 2016. – 144 pp. [In Russ.].
45. Ermakov, A. N. Justification of the Parameters of Contour-Fitting Actuators for Geocars Designed to Break Rock of Medium Strength: Specialization 05.05.06 "Mining Machinery": Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Kemerovo, 2016. – 158 pp. [In Russ.].
46. Gabov, V. V. Test benches for studying the process of cutting coal and potash salt with a single cutter on mining machines / V. V. Gabov, D. A. Zadkov, Yu. V. Lykov, E. V. Kustrikov. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;6:128-134. [In Russ.].
47. Carbonell, J.M. Modeling of Tunneling Processes and Rock Cutting Tool Wear Using the Particle Finite Element Method / J.M. Carbonell, E. Oñate, B. Suárez. *Computational Mechanics*. 2013;52(3):607-629.
48. Dronov, A. A. Justification of the parameters of the geotrek section coupling assembly: specialty 05.05.06 "Mining Machinery": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Kemerovo, 2020. – 169 pp. [In Russ.].
49. Nozirezoda, Sh. S. Justification of Optimal Parameters for Cutting Actuators, Taking into Account Operational Requirements in the Design of a Geohod: Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Kemerovo, 2025. – 168 pp. [In Russ.].
50. Pashkov, D. Justification of the Force and Power Parameters of the Geo-Walker's Actuators for the Breakup of Soft Rocks: Specialization 05.05.06 "Mining Machinery": Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. – Kemerovo, 2021. – 176 pp. [In Russ.].

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Alexey A. Khoreshok, Dr.Sc. (Eng.), Leading researcher of Technogenic Processes Laboratory
e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

Vladimir V. Aksenov, Dr.Sc. (Eng.), Chief researcher of Technogenic Processes Laboratory
e-mail: 55vva42@mail.ru

Vladimir V. Kuznetsov, PhD (Eng.), Leading researcher of Technogenic Processes Laboratory
e-mail: kvv.gmk@kuzstu.ru

Sergey O. Markov, PhD (Eng.), Associate Professor of Open Pit Mining Department; leading researcher of Technogenic Processes Laboratory
e-mail: markovso@kuzstu.ru

Maxim A. Tyulenev, PhD (Eng.), Leading researcher of Technogenic Processes Laboratory
e-mail: tma.geolog@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
10 Leningradsky Ave., Kemerovo, 650010, Russian Federation

