



ISSN 0202-3776

ОБОГАЩЕНИЕ РУД

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. ИЗДАЕТСЯ С 1956 ГОДА

СЕЛЕКТИВНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ
МАГНИЯ ИЗ СЕРПЕНТИНИТОВ
АРВАТЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА АПАТИТОВОГО
КОНЦЕНТРАТА ИЗ ХИБИНСКИХ АПАТИТ-
НЕФЕЛИНОВЫХ РУД ЗОН РАЗРУШЕНИЯ

КОМПЛЕКС ДЛЯ СОЗДАНИЯ ХРАНИЛИЩ
ОСОБО ОПАСНЫХ ОТХОДОВ: ОБОСНОВАНИЕ
КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ

ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА
КВАРЦ-ЛЕЙКОКСЕНА С ПОЛУЧЕНИЕМ
СИНТЕТИЧЕСКОГО ТИТАНИТА

ПУТИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ
АКТАУ(УЗБЕКИСТАН)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1956 году.
Издается один раз в 2 месяца.
Санкт-Петербург

Зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор), ПИ № ФС77-51322
от 19 октября 2012 г.

УЧРЕДИТЕЛИ

АО «Механобр инжиниринг»
Научно-производственная корпорация
«Механобр-техника» (АО)
ФГАОУВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС»
АО «Издательский дом
«Руда и Металлы»
При участии ИПКОН РАН
и Государственного Эрмитажа

Журнал по решению ВАК Министерства
образования и науки РФ включен
в «Перечень ведущих рецензируемых
научных журналов и изданий
для публикации основных
научных результатов диссертаций
на соискание ученой степени
доктора и кандидата наук»
([https://vak.minobrnauki.gov.ru/
uploader/loader?type=19&name=
3408291001&f=15951](https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=19&name=3408291001&f=15951))

© Оформление. АО «Издательский дом
«Руда и Металлы», «Обогащение руд», 2023.

Товарный знак и название «Обогащение руд»
являются исключительной собственностью
ИД «Руда и Металлы».

Подписные индексы:
10344 (ОК «Пресса России»)
Цена свободная

ОБОГАЩЕНИЕ РУД**6(406) ► 2023****СОДЕРЖАНИЕ****ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ**

Булатов К. В., Газалеева Г. И., Шихов Н. В., Назаренко Л. Н.
Разработка схемы обогащения титан-циркониевых песков
месторождения Шокаш, Северный Казахстан.....3

ОБОГАТИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Пиримов Т. Ж., Намазов Ш. С., Темиров У. Ш., Усанбаев Н. Х.
Селективное извлечение соединений магния из серпентинитов
Арватенского месторождения.....9

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

Марчевская В. В., Митрофанова Г. В., Румянцева Н. С.
Исследование состава апатитового концентрата из хибинских
апатит-нефелиновых руд зон разрушения.....16

**Хуррамов Н. И., Рахимова Г. С., Рахматова З. А.,
Нурмуродов Т. И.** Сравнительный анализ физико-химических
свойств фосфоритов месторождений Ташкура и Азнек.....23

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЫРЬЯ

Алматов И. М., Усенов Р. Б., Махмарежабов Д. Б.
Пути комплексной переработки горючих сланцев
месторождения Актау (Узбекистан).....28

Кузин Е. Н., Мокрушин И. Г., Кручинина Н. Е.
Пирометаллургическая переработка кварц-лейкоксена
с получением синтетического титанита.....33

ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

**Фадеева Н. В., Орехова Н. Н., Колодежная Е. В.,
Мусаткина Е. Н.** Исследование процессов дезинтеграции
и динамической классификации графитсодержащей пыли
металлургического производства.....39

ПРИРОДООХРАННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

**Юнгмейстер Д. А., Уразбахтин Р. Ю., Нгуен Кхак Линь,
Тимофеев М. И.** Комплекс для создания хранилищ особо
опасных отходов: обоснование конструкции и параметров.....47

ОБОРУДОВАНИЕ

Петрова Т. А., Епишина А. Д. Антикоррозионная защита
трубопроводного транспорта на горно-перерабатывающих
предприятиях.....52

КОНГРЕССЫ, КОНФЕРЕНЦИИ, СИМПОЗИУМЫ

Актуальность неоспорима (конференция по хвостохранилищам).....8

Перечень статей, опубликованных в журнале
в 2023 году.....59, 60

Реклама.....2–4 (обл.), 15

ISSN 0202-3776



9 770202 377002 >

OBOGASHCHENIE RUD Mineral Processing Journal

Founded in 1956. Issued every two months

CONTENTS

BENEFICIATION TECHNOLOGY

Bulatov K. V., Gazaleeva G. I., Shikhov N. V., Nazarenko L. N.
Development of a beneficiation scheme for titanium-zirconium sands of the Shokash deposit, North Kazakhstan.....3

BENEFICIATION PROCESSES

Pirimov T. Zh., Namazov Sh. S., Temirov U. Sh., Usanbayev N. Kh. Selective recovery of magnesium compounds from serpentinites of the Arvaten deposit.....9

TECHNOLOGICAL MINERALOGY

Marchevskaya V. V., Mitrofanova G. V., Rummyantseva N. S.
Study of the composition of an apatite concentrate obtained from apatite-nepheline ores from Khibiny fracture zones.....16

Khurramov N. I., Rakhimova G. S., Rakhmatova Z. A., Nurmurodov T. I. Comparative analysis of physical and chemical properties of phosphorites from the Tashkura and Aznek deposits.....23

COMPLEX RAW MATERIAL UTILIZATION

Almatov I. M., Usenov R. B., Makhmarezhabov D. B.
Comprehensive processing methods for oil shale from the Aktau deposit (Uzbekistan).....28

Kuzin E. N., Mokrushin I. G., Kruchinina N. E.
Pyrometallurgical processing of quartz-leucosene to produce synthetic titanite.....33

SECONDARY RAW MATERIAL PROCESSING

Fadeeva N. V., Orekhova N. N., Kolodezhnaya E. V., Musatkina E. N. Study of disintegration processes and dynamic classification of graphite-containing dust from metallurgical production.....39

ENVIRONMENT PROTECTION TECHNOLOGY

Yungmeister D. A., Urazbakhtin R. Yu., Nguyen Khak Linh, Timofeev M. I. Tunneling complex for the construction of especially hazardous waste storage facilities: justification of the design and parameters.....47

EQUIPMENT

Petrova T. A., Epishina A. D. Anti-corrosion protection of pipelines at mining and processing enterprises.....52

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Аксенова Г. Я., канд. геол.-минерал. наук,
Александрова Т. Н., член-кор. РАН,
Арсентьев В. А., д-р техн. наук
(главный редактор),

Бажин В. Ю., д-р техн. наук, проф.,
Баранов В. Ф., д-р техн. наук,
Блехман Л. И., канд. техн. наук,
Бричкин В. Н., д-р техн. наук, проф.,
Воробьев А. Г., д-р экон. наук, проф.,
Газалеева Г. И., д-р техн. наук,
Герасимов А. М., канд. техн. наук,
Зуев В. В., д-р геол.-минерал. наук,
Карапетян К. Г., д-р техн. наук, доцент,
Кибирев В. И., канд. техн. наук,
Котова О. Б., д-р геол.-минерал. наук,
Максимов И. И., д-р техн. наук, проф.
(председатель редсовета),

Маякова Е. А. (зав. редакцией),
Михайлова Н. В., канд. техн. наук,
Петров С. В., канд. геол.-минерал. наук,
Пелевин А. Е., д-р техн. наук, доцент,
Рябой В. И., д-р техн. наук, проф.,

Таранов В. А., канд. техн. наук,
Титков С. Н., канд. техн. наук,
Устинов И. Д., д-р хим. наук,
(зам. главного редактора),

Чантурия В. А., академик РАН,
Чантурия Е. Л., д-р техн. наук, проф.
(зам. главного редактора),

Шендерович Е. М., канд. техн. наук,
Шехирев Д. В., канд. техн. наук,
Юнгмейстер Д. А., д-р техн. наук, проф.,
Юшина Т. И., канд. техн. наук
(зам. председателя редсовета).

Иностранные члены редсовета:

Вутов Ц., д-р, проф. (Болгария),
Довнорович С., д-р (Польша),
Ёнал Г., проф. (Турция),
Пилов П. И., д-р техн. наук, проф.
(Украина).

Редактор *И. Н. Сапрыкина*

Адрес редакции:
199106, Санкт-Петербург, 22 линия, 3.
Телефон/факс: (812) 324 89 45.
E-mail: or@rudmet.ru
Internet: <http://www.rudmet.ru>

Издатель: Издательский дом «Руда
и Металлы», 119049, Москва,
Ленинский пр., д. 6, стр. 2, офис 622.
Фото на обложке — с сайта 64parallel.ru.

КОМПЛЕКС ДЛЯ СОЗДАНИЯ ХРАНИЛИЩ ОСОБО ОПАСНЫХ ОТХОДОВ: ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ

Д. А. ЮНГМЕЙСТЕР¹, Р. Ю. УРАЗБАХТИН¹, НГУЕН КХАК ЛИНЬ², М. И. ТИМОФЕЕВ¹

(1 — Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, РФ; 2 — Ханойский университет горного дела и геологии, г. Ханой, Вьетнам)*

Проведены исследования по определению конструктивных и силовых параметров гидродомкратов передвижки, которые обеспечат надежное и безопасное перемещение комплекса для создания хранилищ особо опасных отходов и его компонентов. Установлено теоретическое значение коэффициента сопротивления движению комплекса (0,4–6), которое указывает на различные факторы, включая массу частей самого устройства, крепость пород и шаг передвижки. Рассмотрены особенности работы при различных крепостях пород, даны рекомендации по выбору силового оборудования. Для их подтверждения был проведен процесс нагружения 3D-модели секции шагающей крепи с использованием метода конечных элементов в программе AutoDesk Inventor. По результатам моделирования произведено усиление конструкций для обеспечения безопасности работы комплекса.

Ключевые слова: экология, хранилище особо опасных отходов, хранение радиоактивных отходов, проходческий комплекс, крепость пород, сменный исполнительный орган, 3D-моделирование.

DOI: 10.17580/or.2023.06.08

Введение

Во многих развитых и развивающихся странах увеличивается количество подземных хранилищ особо опасных отходов атомной, металлургической, химической и других промышленных отраслей, которые непригодны для переработки и обезвреживания [1–3]. Данные хранилища используются преимущественно там, где производятся добыча и обогащение полезных ископаемых, таких как уран или торий. Например, специальное подземное сооружение Uranium City (Канада) предназначено для хранения отходов уранового производства в провинции Саскачеван [4].

Рост числа подземных хранилищ обуславливается увеличением численности населения, развитием технологий и наличием неблагоприятных климатических условий на открытой местности. Для захоронения особо опасных отходов зачастую используют отработанные горные выработки или вновь построенные [5–7].

В результате возникновения природных катаклизмов, инженерных ошибок при проектировании, строительстве и обслуживании подземных хранилищ происходит нарушение целостности их конструктивного материала, а также сплошности прилегающих пород.

Данные последствия приводят к негативному воздействию на окружающую среду из-за миграции загрязняющих веществ в водной [8, 9] и почвенной средах [10, 11]. В настоящее время остро стоит вопрос создания проходческого комплекса, состоящего из быстросборных модульных узлов облегченного типа и различного навесного оборудования для обработки забоя различной крепости [12–14]. Его применение должно заменить малоэффективный ручной труд, который используется сегодня при проведении проходческих работ, позволит повысить скорость проходки выработок малого сечения и снизить количество травмированных ситуаций для шахтеров, находящихся непосредственно в зоне риска при восстановлении разрушенных хранилищ особо опасных отходов.

Машины для проходки горизонтальных выработок включают следующие виды оборудования: устройства для строительства в массивах со слабой устойчивой кровлей (рис. 1, *а–в*), комплексы с исполнительным органом корончатого, экскаваторного, роторного, барабанного типа (рис. 1, *г–ж*) [15–18].

Проходка выработок малого сечения существующим оборудованием (рис. 1, *а–ж*) при восстановлении разрушенных хранилищ не может быть произведена ввиду его значительных габаритов и массы, а также высокого уровня сложности монтажно-демонтажных работ [19].

На базе кафедры машиностроения Санкт-Петербургского горного университета осуществлена разработка и патентование проходческого комплекса [20], который состоит из быстросборных модульных узлов: устройства для обработки горного массива; шагающей крепи; крепеустановщика; вентиляционных труб; ленточных перегружателей; рамной крепи [21, 22]. Комплекс создан с целью повышения эффективности и безопасности строительства подземных выработок.

* Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич — профессор, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, Yungmeister_DA@pers.spmi.ru; Уразбахтин Рустам Юсуфович — исполнительный директор НОЦ коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием, канд. техн. наук, urazbakhtin_gyu@pers.spmi.ru; Нгуен Кхак Линь — ассистент, канд. техн. наук, khaclinhhung@gmail.com; Тимофеев Максим Игоревич — студент, s181244@stud.spmi.ru.

© Юнгмейстер Д. А., Уразбахтин Р. Ю., Нгуен Кхак Линь, Тимофеев М. И., 2023

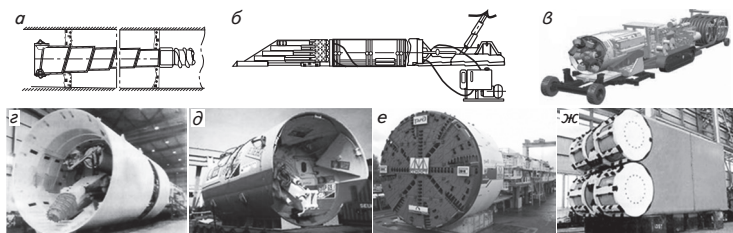


Рис. 1. Машины для проходки горизонтальных выработок в: завалах (а), слабоустойчивых грунтах (б), крепких породах (в), породах малой и средней (г), малой (д, ж), средней и высокой (е) крепости [18]

Быстрособорные модульные узлы позволяют оперативно осуществлять монтажно-демонтажные работы, что существенно сокращает время настройки и наладки оборудования. Устройство для обработки горного массива осуществляет разрушение и выемку породы, что позволяет повысить точность выполнения работ и минимизировать риск возникновения аварийных ситуаций. Шагающая крепь предназначена для обеспечения безопасности горнорабочих и оборудования при проходке выработок в породах низкой крепости. Ленточные перегружатели служат для транспортировки разрушенной породы. Вентиляционные трубы обеспечивают подачу к забою свежего и отведение отработанного воздуха. Крепеустановщик, обладающий высокой маневренностью и управляемостью, предназначен для быстрой и точной установки рамной крепи. Рамная крепь поддерживает выработку за проходческим комплексом [20].

Реализация представленного комплекса позволит достичь следующих преимуществ: 1) увеличить производительность благодаря совмещению операций по разрушению породы в призабойном пространстве и креплению выработки за комплексом; 2) снизить затраты вследствие использования модульных узлов, что позволяет сократить расходы на оборудование и его настройку, уменьшить количество необходимого персонала и снизить общую стоимость производства и работ; 3) увеличить мобильность — быстрособорные модульные узлы позволяют оперативно переносить оборудование на новые участки; 4) снизить воздействие на окружающую среду, поскольку быстрособорные модульные узлы обеспечивают более эффективное использование ресурсов и сокращение отходов.

Обоснование параметров силового оборудования

Применен системный подход, а именно аналитические и вычислительные методы с использованием математического моделирования и классических положений механики грунтов.

Рациональные характеристики силового оборудования могут быть подобраны в соответствии с теоретическими исследованиями, выполненными при условии уравнения баланса сил при передвижке нагруженного комплекса [23–25]. На рис. 2, а показано, что обоснование схемы нагрузки перекрытий крепи и ее ограждений вертикальными и боковыми силами, а также расчет конструктивных элементов крепи

могут быть осуществлены при определении точного значения силы передвижки F_T . Знание данных характеристик способствует обоснованию выбора силового оборудования, диаметров силовых гидроцилиндров и давления гидравлической сети [26–28].

На рис. 2 показаны различные схемы силового взаимодействия перекрытия крепи с кровлей при определенных вариациях обрушения прилегающего горного массива со стороны кровли и боков выработки, возникшего в результате перераспределения напряжений или удара [29, 30]. В свою очередь, форма и наибольший линейный размер горной выработки оказывают влияние на элементы конструкций комплекса [31–33].

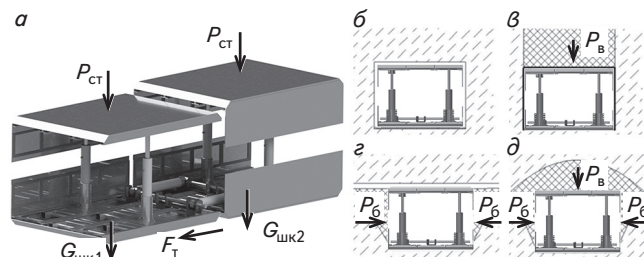


Рис. 2. Варианты воздействия нагрузок со стороны горного массива на шагающую крепь проходческого комплекса:

а — общий вид; б — силовое воздействие отсутствует; в — воздействуют только вертикальные нагрузки; г — воздействуют только горизонтальные нагрузки; д — воздействуют вертикальные и горизонтальные нагрузки

На рис. 3 и 4 показаны результаты теоретических исследований, которые позволяют выявить интервал значений коэффициента сопротивления передвижению частей комплекса, которые варьируются в широком диапазоне и обуславливаются различными вариантами нагружения проходческого комплекса (рис. 2) [34–36].

Как видно из рис. 3, значения коэффициента сопротивления передвижке секции крепи комплекса $k_{сопр.}$ при воздействии нагрузок на его перекрытия со стороны кровли, боков, кровли и боков выработки находятся в интервале 0,5–3, 0,4–0,85 и 0,5–6 соответственно.

Из рис. 4 видно, что при уменьшении крепости пород на шагающую крепь проходческого комплекса

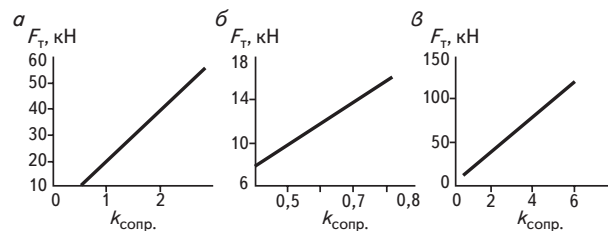


Рис. 3. Теоретическая зависимость усилия передвижки шагающей крепи от коэффициента сопротивления передвижке секции крепи комплекса при воздействии нагрузок на его перекрытия со стороны кровли (а), боков (б), кровли и боков выработки (в)

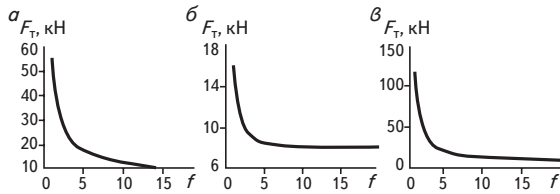


Рис. 4. Теоретическая зависимость усилия передвижки шагающей крепи от коэффициента крепости пород при воздействии нагрузок на перекрытия комплекса со стороны кровли (а), боков (б), кровли и боков выработки (в)

при проходке выработки увеличивается давление со стороны прилегающего горного массива, что обусловлено потерей устойчивости формы свода естественного равновесия. Вследствие этого увеличиваются значения коэффициента сопротивления передвижки секции крепи комплекса и усилия, необходимого для передвижки крепи.

На рис. 5 представлена экспериментальная зависимость изменения усилия для передвижки модели крепи F_m от времени t при фиксированной скорости передвижки $v = 0,1$ м/с и ее шаге $l = 0,2$ м.

Определение действительного усилия передвижки секции комплекса определяется по формуле, базирующейся на переходе от параметров модели к параметрам оригинала

$$F_n = F_m \cdot k_m,$$

где F_m — значение усилия передвижки модели, полученное экспериментально; k_m — масштабный коэффициент, $k_m = m_n / m_m$ (где m_n, m_m — масса оригинала и модели секции проходческого комплекса соответственно).

При воздействии нагрузок (рис. 5, кривая 4) на перекрытия модели комплекса со стороны кровли и боков горной выработки проявляется максимальное значение усилия передвижки модели ($F_m = 233,78$ Н). Использование масштабного коэффициента $k_m = 500$ позволяет по основным параметрам, полученным при использовании модели, рассчитать параметры крепи комплекса с действительными габаритами. Таким образом, при размерах крепи комплекса 1,5 м сила передвижки, а также коэффициент сопротивления ей составляют $F_n = 116,9$ кН, $k_{сопр.} = 5,9$, что подтверждается значениями, полученными теоретически, ($F_m = 120$ кН и $k_{сопр.} = 6$).

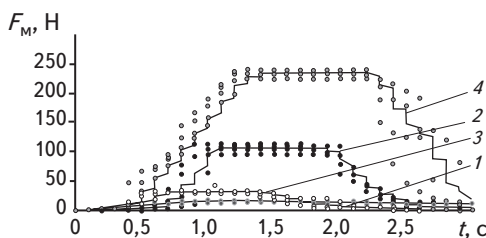


Рис. 5. Зависимости силы для передвижки модели крепи от времени воздействия нагрузок со стороны горного массива на перекрытия комплекса при его отсутствии (1), воздействии только вертикальных (2), только горизонтальных (3), вертикальных и горизонтальных (4) нагрузок

Обоснование выбора компоновки гидравлического оборудования

Обоснование типа гидроцилиндров для шагающей крепи проходческого комплекса основано на сравнении параметрического ряда диаметров их поршней и давлений гидравлической системы с коэффициентами крепости пород и сопротивления передвижению передней или задней частей комплекса по породе, теоретически и экспериментально подтвержденными в предыдущем разделе статьи. Все перечисленные параметры учтены и связаны в составленной номограмме [11], при использовании которой появилась возможность обосновать выбор силового оборудования, а именно типов гидроцилиндров шагающей крепи.

Зависимость $k_{сопр.}$ в самом неблагоприятном случае (воздействие вертикальных и горизонтальных сил на перекрытия) обусловлена влиянием горных масс, действующих на перекрытия комплекса со стороны горного массива, и выражается степенной функцией вида $k_{сопр.}(f) = 4,3959f^{-0,802}$, при этом значения коэффициентов, определенные методом аппроксимации, равны 4,395 и $-0,802$ соответственно [11].

Выбор гидроцилиндров шагающей крепи проходческого комплекса, в первую очередь, основывается на характеристиках горного массива (крепость породы). Далее крепость породы сверяют с наибольшим значением коэффициента сопротивления передвижению передней или задней частей комплекса $k_{сопр.}$, на основе которого выбираются гидроцилиндры, необходимые для создания усилия передвижки шагающей крепи.

С целью упрощения выбора гидроцилиндров шагающей крепи была составлена номограмма, учитывающая несколько переменных. Так, в самом неблагоприятном случае, когда при воздействии нагрузок на перекрытия комплекса со стороны кровли и боков выработки значение коэффициента крепости пород $f = 1$, коэффициента сопротивления перемещению шагающей крепи комплекса $k_{сопр.} = 6$, рабочее усилие, необходимое для обеспечения передвижки комплекса, $F_r = 120$ кН, а диаметры поршней гидроцилиндров и давление в сети должны соответствовать $d = 100$ мм, $p = 25$ МПа (с учетом трехкратного коэффициента запаса $k_z = 3$ и минимально необходимого количества работающих параллельно гидроцилиндров $n = 2$) [11].

Одним из главных требований при выборе гидравлического оборудования для работы в подземных условиях являются компактность узлов комплекса и возможность их быстрой сборки или замены, что соответствует выбору меньшего диаметра поршня и давления в гидравлической сети.

Анализ критических напряжений в элементах шагающей крепи в среде AutoDesk Inventor

Проанализирован процесс нагружения 3D-модели секции шагающей крепи проходческого комплекса (рис. 6) методом конечных элементов. Рассмотрен самый неблагоприятный вариант — сосредоточенное нагружение, аналогичное нагрузкам, возникающим в ре-

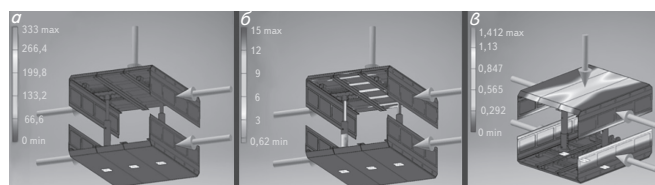


Рис. 6. Результаты моделирования элементов крепи проходческого комплекса в среде AutoDesk Inventor:
 а — предел напряжений; б — коэффициент запаса прочности; в — смещение в пространстве

зультате обрушения кровли и боков выработки и воздействия крупных кусков породы с выступающими углами на перекрытия крепи проходческого комплекса.

Задавалось воздействие сосредоточенной нагрузки на перекрытия и боковые стенки механизированной шагающей крепи со стороны кровли (109 кН) и боков (14 кН) горной выработки.

По результатам моделирования выявлено, что предел напряжений в элементах крепи — 50 МПа, не превышающий предела текучести выбранного материала — Сталь 45 (рис. 6, а); минимальный коэффициент запаса прочности элементов крепи комплекса равен 4 (рис. 6, б); максимальное значение смещения верхнего перекрытия составляет 1,4 мм (рис. 6, в).

Результаты моделирования показывают, что конструктивные и силовые параметры определены верно.

Выводы

Рассмотрены особенности работы проходческого комплекса при различных крепостях пород в выработ-

ке, предложены рекомендации по выбору его силового оборудования с использованием номограммы определения типов гидроцилиндров, основанной на изменении величины усилия передвижки F_p , которая определялась аналитически и была подтверждена серией экспериментов.

Внедрение проходческого комплекса, состоящего из быстросборных модульных узлов на базе шагающей крепи, позволит:

- увеличить производительность вследствие совмещения операций по разрушению горной породы в призабойном пространстве и креплению выработки за проходческим комплексом;
- повысить мобильность, что обусловливается наличием быстросборных модульных узлов, использование которых позволит быстро переносить оборудование на новые участки строительства подземных выработок;
- сократить затраты на оборудование и его наладку, уменьшить количество необходимого персонала и снизить общую стоимость производства и работ;
- уменьшить вредное воздействие на окружающую среду за счет более эффективного использования ресурсов и сокращения отходов;
- минимизировать ручной труд и травматизм среди горнорабочих, а также время на строительство новых или восстановление разрушенных хранилищ особо опасных отходов.

Список литературы

См. англояз. блок статьи. **□□**

OBOGASHCHENIE RUD, 2023, No. 6, pp. 47–51
 DOI: 10.17580/or.2023.06.08

Tunneling complex for the construction of especially hazardous waste storage facilities: justification of the design and parameters

Information about authors

Yungmeyster D. A.¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Yungmeyster_DA@pers.spmi.ru;

Urazbakhtin R. Yu.¹, Executive Director of the Center for Shared Use of High-Tech Equipment, Candidate of Engineering Sciences, urazbakhtin_ryu@pers.spmi.ru;

Nguyen Khak Linh², Assistant, Candidate of Engineering Sciences, khaclinhhumg@gmail.com;

Timofeev M. I.¹, Student, s181244@stud.spmi.ru.

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University (St. Petersburg, Russia).

² Hanoi University of Mining and Geology (Hanoi, Vietnam).

Abstract

The ongoing industrial and production advancements lead to the large-scale accumulation of especially hazardous waste that is unfit for recycling or disposal and requires special treatment and storage. Construction of new or restoration of previously destroyed storage facilities for such waste will safeguard the environment and help meet the applicable environmental standards, i. e. when storing radioactive waste generated in ore mining, enrichment of uranium and thorium, and processing of their concentrates. The purpose of this work is to specify the design and power parameters for roof support travel hydraulic jacks to ensure reliable and safe relocation of the machine used for the construction of the above storage facilities and its components. The systemic approach used in this work covers various

aspects and methods of analysis. Analytical methods enable theoretical analysis and allow building models of the system based on the basic principles of theoretical mechanics. Computational methods are used for numerical modeling and solving the resulting mathematical models. A theoretical value of the motion resistance coefficient has been established for the machine at 0.4 to 6. This indicates high motion resistance caused by various factors, including the weight of machine parts, the rock strength, and the travel increment size. Machine operation specifics for various rock strengths are discussed and recommendations are given for the selection of power equipment. In order to confirm the data, a 3D model loading process was performed for a walking roof support section using the finite element method in the AutoDesk Inventor software. Based on the modeling results, the structures were additionally reinforced to ensure safe operation of the machine.

Key words: environmental studies, storage of especially hazardous waste, storage of radioactive waste, tunnel boring machine, rock strength, replaceable operating member, 3D modeling.

References

1. Marsh A. I., Williams L. G., Lawrence J. A. The important role and performance of engineered barriers in a UK geological disposal facility for higher activity radioactive waste. *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Vol. 137. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103736.
2. Kale R. C., Ravi K. A review on the impact of thermal history on compacted bentonite in the context of nuclear waste management. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 23. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101728.
3. Gee G. W., Meyer P. D., Ward A. L. Nuclear waste disposal. *Encyclopedia of soils in the environment*. Oxford: Elsevier Ltd., 2005. pp. 56–63.
4. Kim M.-J., Lee S.-R., Yoon S., Jeon J.-S., Kim M.-S.

Optimal initial condition of a bentonite buffer with regard to thermal behavior in a high-level radioactive waste repository. *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 104. pp. 109–117.

5. Cui C.-Q., Wang B., Zhao Y.-X., Xue L.-M. Waste mine to emerging wealth: Innovative solutions for abandoned underground coal mine reutilization on a waste management level. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 252. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119748.

6. Chen T., Yang N. Study on the underground storage of hazardous waste of the micro-seismic signal based on the S-transform time-frequency analysis. *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 31. pp. 426–431.

7. Chen X., Li Y., Shi Y., Yu Y., Jiang Y., Liu Y., Dong J. Tightness and stability evaluation of salt cavern underground storage with a new fluid–solid coupling seepage model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 202. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108475.

8. Hacıoğlu F., Özdemir T., Çavdar S., Usanmaz A. Possible use of EPDM in radioactive waste disposal: Long term low dose rate and short term high dose rate irradiation in aquatic and atmospheric environment. *Radiation Physics and Chemistry*. 2013. Vol. 83. pp. 122–130.

9. Foster R. I., Amphlett J. T. M., Kim K.-W., Kerry T., Lee K.-Y., Sharrad C. A. SOHIO process legacy waste treatment: Uranium recovery using ion exchange. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020. Vol. 81. pp. 144–152.

10. Wei G., Han W., Shu X., Luo F., Tang H., Chen S., Lu X. Heavy-ion irradiation effects on uranium-contaminated soil for nuclear waste. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 405. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124273.

11. Álvarez-Ayuso E., Murciego A., Rodríguez M. A., Mosser-Ruck R. Cement encapsulation processes to mitigate the risks posed by different types of antimony-bearing mine waste. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 372. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133671.

12. Bolobov V. I., Plashchinsky V. A. On the assessment of energy consumption when splitting rock fragments. *Obogashchenie Rud*. 2023. No. 2. pp. 3–8. DOI: 10.17580/or.2023.02.01.

13. Lavrenko S. A., Shishlyannikov D. I. Performance evaluation of heading-and-winning machines in the conditions of potash mines. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. DOI: 10.3390/app11083444.

14. Zhukov I. A., Martyushev N. V., Zyukin D. A., Azimov A. M., Karlina A. I. Modification of hydraulic hammers used in repair of metallurgical units. *Metallurgist*. 2023. Vol. 66. pp. 1644–1652.

15. Fiscor S. Rescuers work to free chilean miners. *Engineering and Mining Journal*. 2010. Vol. 211, Iss. 8. pp. 24–26.

16. Kral S. Remarkable rescue unfolds. *Mining Engineering*. 2010. Vol. 62, Iss. 9. p. 96.

17. Liu Z., Ni F., Wei C., Li H. Experimental and numerical investigation of roadheader for breaking rock containing predrill holes. *Energy Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, Iss. 7. pp. 2511–2526.

18. Yacheykin A. I. Determination of rational designs and parameters of the executive body of large-diameter tunneling shields for the mining and geological conditions of the mines of Metrostroy St. Petersburg. Diss. for the degree of Candidate of Engineering Sciences. St. Petersburg, 2021. 135 p.

19. Gabov V. V., Nguyen Van Xuan, Zadkov D. A., Tran Duc Tho. Increasing the content of coarse fractions in the mined coal mass by a combine using paired cuts. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2022. Vol. 257. pp. 764–770.

20. Urazbakhtin R. Yu., Yungmeister D. A. The results of theoretical and laboratory studies of the rescue complex for coal mines. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta*. 2019. Iss. 3. pp. 98–103.

21. Shemyakin S. A., Shishkin E. A. Physical and mathematical model of rock destruction by a milling machine cutter. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2021. Vol. 251. pp. 639–647.

22. Averin E. A., Zhabin A. B., Polyakov A. V., Linnik Y. N., Linnik V. Y. Transition between relieved and unrelieved modes when cutting rocks with conical picks. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2021. Vol. 249. pp. 329–333.

23. Linh N. K., Chien D. V., Gabov V. V., Giap D. V., Tien P. V. Study of the influence of structure and parameters of loading and transporting devices of a cleaning combine on the efficiency of coal loading. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1384. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012036.

24. Yasar S., Yilmaz A. O. Vertical rock cutting rig (VRCR) suggested for performance prediction of roadheaders. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019. Vol. 33, Iss. 3. pp. 149–168.

25. Kahraman S., Sercan Aloglu A., Aydin B., Saygin E. The needle penetration index to estimate the performance of an axial type roadheader used in a coal mine. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2019. Vol. 5, Iss. 1. pp. 37–45.

26. Gamez-Montero P. J., Salazar E., Castilla R., Freire J., Khamashta M., Codina E. Misalignment effects on the load capacity of a hydraulic cylinder. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2009. Vol. 51. pp. 105–113.

27. Yong X., Yang J., Shang J., Xie H. Design and optimization of a new kind of hydraulic cylinder for mobile robots. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2015. Vol. 229, Iss. 18. DOI: 10.1177/0954406215570106.

28. Zhang M., Lyu F., Fu S., Cai X., Zong K., Wu M. Study on the pitch angle control of a robotized hydraulic drive roadheader using different control methods. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. Vol. 32, Iss. 10. pp. 4893–4901.

29. Rybak J., Khayrutdinov M. M., Kuziev D. A., Kongar-Syuryun Ch. B., Babyr N. V. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2022. Vol. 253. pp. 61–70.

30. Nguyen Tai Tien, Karasev M. A. Optimization of geometry design of quasi-rectangular section tunnel by the force criterion. *Gornyi Informatsionno-analiticheskiy Byulleten'*. 2021. No. 6. pp. 59–71.

31. Zhang L., Tian M., Song J., He Y., Feng J., Liu X. Hardness recognition method of roadheader's cutting rock wall based on multi-source data fusion. *Zhendong yu Chongji / Journal of Vibration and Shock*. 2020. Vol. 39, No. 13. pp. 7–15.

32. Karasev M. A., Tien Tai Nguyen. Method for predicting the stress state of the lining of under-ground structures of quasi-rectangular and arched forms. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2022. Vol. 257. pp. 807–821.

33. Gospodarikov A. P., Trofimov A. V., Kirkin A. P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uniaxial servohydraulic loading. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2022. Vol. 256. pp. 539–548.

34. Korshunov V. A., Pavlovich A. A., Bazhukov A. A. Evaluation of the shear strength of rocks by cracks based on the results of testing samples with spherical indentors. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2023. Vol. 262. pp. 606–618.

35. Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo P. E. Prediction of the stress-strain state and stability of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2022. Vol. 254. pp. 252–260.

36. Kazanin O. I., Ilinets A. A. Ensuring the excavation workings stability when developing excavation sites of flat-lying coal seams by three workings. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2022. Vol. 253. pp. 41–48.