

Экспериментальная база по изучению физико-механических свойств горных пород на примере лаборатории ВНИМИ

Е.В. Лодус, Б.Г. Тарасов✉

АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ info@vnimi.ru

Резюме: Кратко описана история развития экспериментальной базы ВНИМИ на примере лаборатории по изучению физико-механических свойств горных пород в широком диапазоне условий нагружения. Особое внимание уделено современной оснащённости лаборатории. Приведены схемы установок и краткое их описание. Показано, что с целью совершенствования геофизических приборов, создаваемых ВНИМИ, сегодня вводится в строй специальная установка для максимального воспроизведения реальных условий силовой работы массива горных пород. Стенд «Универсальный» целенаправленно выявляет закономерности изменения сейсмических характеристик деформирования и разрушения пород от вида напряжённого состояния и энергозапаса на нагружающей системе.

Ключевые слова: экспериментальные установки, физико-механические свойства горных пород, история развития, универсальный стенд

Для цитирования: Лодус Е.В., Тарасов Б.Г. Экспериментальная база по изучению физико-механических свойств горных пород на примере лаборатории ВНИМИ. *Горная промышленность*. 2024;(3S):53–56. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-53-56>

Test facilities to study physical and mechanical properties of rocks as exemplified by the VNIMI laboratory

E.V. Lodus, B.G. Tarasov✉

VNIMI JSC, St. Petersburg, Russian Federation

✉ info@vnimi.ru

Abstract: The paper briefly outlines the development history of the experimental facilities at VNIMI using the example of the laboratory to study the physical and mechanical properties of rocks in a wide range of loading conditions. A special attention is given to the current equipment in the laboratory. Schematic diagrams of the test benches are provided accompanied by their brief description. It is shown that in order to improve the geophysical instruments developed at VNIMI, a dedicated test bench is currently commissioned to reproduce as much as possible the real conditions of the stressed operation of the rock mass. The Universal test bench specifically reveals the regularities of changes in seismic characteristics of rock deformation and rock failure depending on the type of the stress state and the energy stored in the loading system.

Keywords: test facilities, physical and mechanical properties of rocks, development history, universal test bench

For citation: Lodus E.V., Tarasov B.G. Test facilities to study physical and mechanical properties of rocks as exemplified by the VNIMI laboratory. *Russian Mining Industry*. 2024;(3S):53–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-53-56>

Введение

ВНИМИ является основоположником современной геомеханики. На протяжении всего существования ВНИМИ, начиная с 1929 г., в нем велись работы по изучению проявления горного давления, горных ударов, сдвига горных пород, устойчивости бортов карьеров, а также разрабатывались маркшейдерские приборы и др. Исследования проводились как в натуральных условиях, так и в различных лабораториях ВНИМИ. Лаборато-

рии, которые занимались изучением механики массивов и физических свойств горных пород в условиях широкой вариации условий нагружения, были основаны Г.Н. Кузнецовым (Лаборатория моделирования) и А.Н. Ставрогиным (Лаборатория динамической прочности и высоких давлений). Лаборатории всегда были оснащены передовым испытательным оборудованием, которое разрабатывалось сотрудниками лабораторий на базе многочисленных изобретений. Важно отметить, что парк оборудования

постоянно обновлялся и расширялся за счет внедрения более совершенных систем, для более глубокого проникновения в суть изучаемого объекта. Так, например, на начальном этапе лаборатория Ставрогина была оснащена комплексом установок, которые были рассчитаны для изучения допредельных свойств горных пород. Наиболее важные системы перечислены ниже:

- установка высоких давлений пропорционального нагружения (боковое давление до 200 МПа, что соответствует глубинам в земной коре до ≈ 8 км);
- динамическая установка трехосного сжатия (боковое давление до 200 МПа, скорость нагружения до 10^2 1/с);
- установки длительных испытаний (УДИ) при одноосном и объемном сжатии. Время испытаний отдельных образцов достигало 5 лет.

По результатам испытаний на этих установках была разработана Ставрогиным [1] теория деформации и разрушения горных пород в широком диапазоне боковых давлений (от 0 до 200 МПа) и скоростей нагружения в 9 десятичных порядков (от скоростей ползучести 10^{-7} до скоростей 10^2 1/с, соответствующих скоростям природных динамических явлений, таких как горные удары).

Важным этапом в развитии лаборатории было создание комплекса оборудования для изучения разрушения пород за пределом прочности. Это было вызвано потребностями горной практики, которая столкнулась с проблемой горных ударов, происходивших в постоянно углубляющихся выработках. Для запредельных исследований необходимы были специальные установки с высокой жесткостью нагружения. Лаборатория была первой в СССР, где эти системы были созданы. Они обладали рекордной жесткостью, что позволило изучать запредельные свойства очень прочных и хрупких пород.

Наиболее важные жесткие установки перечислены ниже:

- супержесткая установка одноосного сжатия;
- установка объемного сжатия (диапазон бокового давления 0–200 МПа);
- динамическая установка с максимальной скоростью деформации до 10^2 1/с;
- фильтрационная установка для изучения влияния газового и жидкостного фактора на разрушение горных пород;
- установка для изучения баланса энергии при спонтанном разрушении за пределом прочности с вариацией жесткости нагружения в 2000 раз.

По результатам испытаний на этих машинах была создана теория запредельной деформации горных пород и были установлены критерии хрупкости пород и удароопасности горных выработок с учетом газового и жидкостного факторов [2–11]. С целью оценки степени удароопасности в течение многих лет проводилось тестирование образцов горных пород, поставляемых из разных подземных предприятий, и модельных образцов, создаваемых искусственно из поликристаллов соляных пород.

Современная экспериментальная база

Современный ВНИМИ сделал еще один принципиально важный шаг в борьбе за безопасное ведение горных работ. На базе новых технологий были созданы геофизические приборы (GITS, Ангел-М и др.), которые устанавливаются

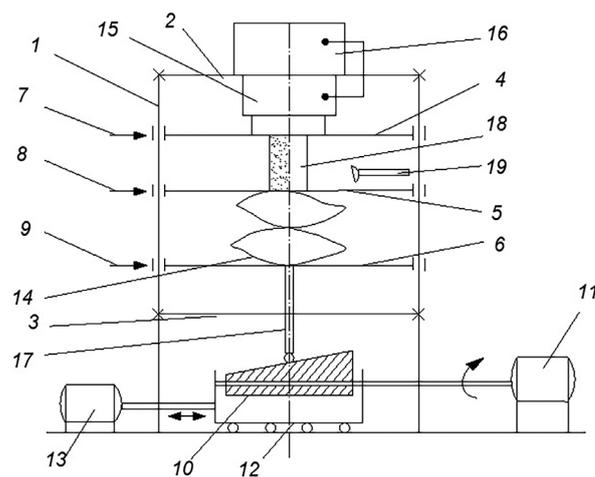


Рис. 1
Стенд «Универсальный»

Fig. 1
The Universal test bench

на действующих выработках и дают возможность непрерывного онлайн-контроля за динамической активностью вокруг работающих выработок и выявления наиболее опасных участков с целью предотвращения горных ударов.

С целью совершенствования геофизических приборов сегодня вводится в строй специальная установка для максимального воспроизведения реальных условий силовой работы массива горных пород (рис. 1). Стенд «Универсальный» целенаправленно выявляет закономерности изменения сейсмических характеристик деформирования и разрушения пород от вида напряженного состояния и энергозапаса на нагружающей системе. На направляющих 1 размещены две неподвижные траверсы 2, 3 и три подвижные 4, 5, 6 траверсы с фиксаторами 7, 8, 9 подвижных траверс на направляющих 1. Конусный возбудитель 10 циклической нагрузки имеет привод вращения 11 и установлен на каретке 12 с приводом 13 горизонтального перемещения. Между траверсами 5 и 6 установлен пружинный накопитель 14 энергии упругих деформаций. Между траверсами 2 и 4 установлен гидравлический нагружатель 15 фоновой нагрузки с насосной станцией 16. Циклическая нагрузка от вращающегося возбудителя 10 передается толкателем 17. Испытуемый образец обозначен позицией 18, сейсмический прибор обозначен позицией 19. Типовые датчики напряжений и деформаций на схеме не показаны.

Все режимы испытаний, реализуемые на данном стенде, могут быть выполнены на одном и том же образце без его разгрузки при смене режима. Фоновая нагрузка создается нагружателем 15 и насосной станцией 16 при выключенном фиксаторе 7. При непрерывном повышении фоновой нагрузки вплоть до разрушения образца 18 реализуется режим кратковременной прочности. Для испытаний на ползучесть выключают фиксаторы 7 и 8 при включенном фиксаторе 9 и после достижения заданной нагрузки на образце пружинный накопитель 14 обеспечивает длительное удержание нагрузки ползучести. Для испытаний на релаксацию напряжений после достижения заданной деформации образца включают фиксаторы 7 и 8, удерживая тем самым заданную деформацию длительное время. Для циклических испытаний при выключенных фиксаторах 7, 8, 9 включают привод вращения 11 конусным возбудителем 10, через толкатель 17 и пружинный накопитель 14.

1 Каталог планшетов механических характеристик горных пород, опасных в отношении динамических явлений, с учетом запредельной области, газового и жидкостного факторов. Л.: ВНИМИ; 1980. 53 с.

ны 14 циклически нагружают образец. Частота циклов регулируется приводом 11. Амплитуда циклов регулируется положением каретки 12 приводом 13. В процессе испытаний ведется синхронная регистрация нагрузки, деформаций образца, сейсмических сигналов. Испытания проводятся при нагрузках до 20 т, при частоте циклов до 50 Гц. Энергозапас регулируется количеством и жесткостью пружин энергоаккумулятора. В результате выявляются закономерности изменения сейсмических сигналов, характера разрушения в зависимости от энергозапаса на нагружающей системе, что повышает точность прогноза динамических явлений.

На рис. 2–5 показаны другие установки, сегодня используемые ВНИМИ.

Метод получения искусственных поликристаллов разработан во ВНИМИ с целью исследования влияния структурных характеристик на деформационно-прочностные. Получают поликристаллы путём механического прессования кристаллов 1 соли (рис. 2) в матрице 2. Исследуют влияние диаметра зерна, плотности, пористости, состава соляных пород, в том числе и на удароопасные свойства солей.

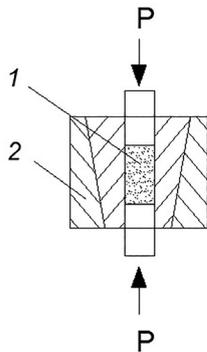


Рис. 2
Пресс-форма

Fig. 2
The press-tool

Установка для исследования процессов энергообмена при взаимном смещении блоков пород в массиве (рис. 3). Стенд «Подвижка» работает с двумя образцами 1 и 2 горных пород, каждый из которых сохраняет особенности блоков массива, из которых они изготовлены. Образцы-блоки поджимаются друг к другу (аналог действия гравитационной силы) и сдвигаются друг относительно друга (аналог действия тектонической силы). Запасы энергии упругих деформаций на окружающих породах от действия этих сил аккумулируются на пружинном 3 и гидравлическом 4 аккумуляторах энергии. Динамичность энергообмена, т.е. реализации запасенной энергии при взаимном смещении образцов-блоков, фиксируется сейсмическими приборами 5 и датчиками нагрузок-деформаций.

Установка для исследования несущей способности горных пород при наложении режимов нагружения (рис. 4). Стенд «Режим» является рычажным и работает с породами низкой прочности. Образец 1 нагружается двуплечим рычагом 2 с грузами 3, 4. При сбросе груза 3 создается ударная пригрузка, при перемещении груза 4 вдоль дуги 5 создается одноцикловое или двухцикловое пригружение образца по затухающим циклам. Весь процесс силовой работы образца фиксируется сейсмическими приборами 6 и датчиками нагрузок-деформаций.

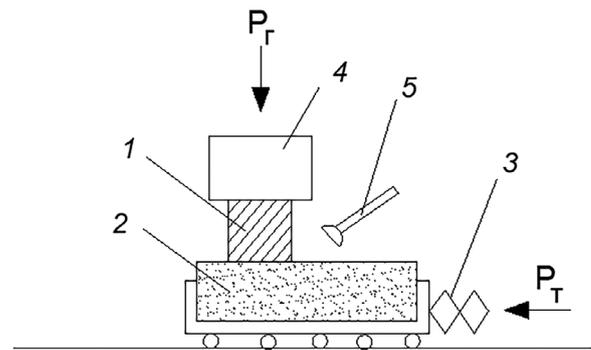


Рис. 3
Стенд «Подвижка»

Fig. 3
The Shearing test bench

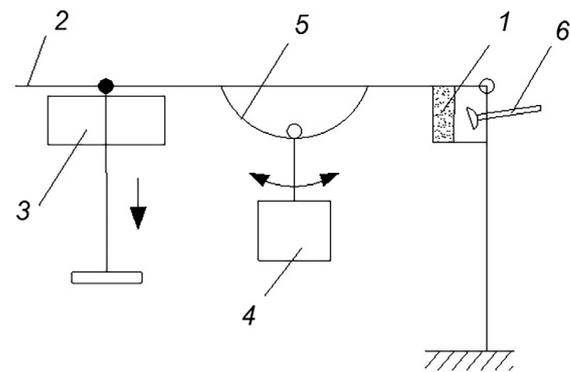


Рис. 4
Стенд «Режим»

Fig. 4
The Mode test bench

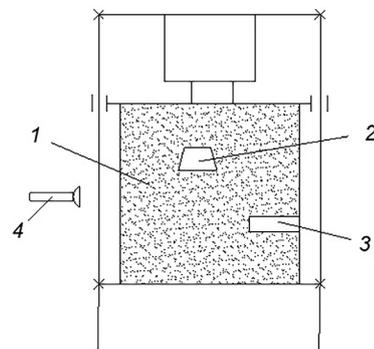


Рис. 5
Стенд «Монолит»

Fig. 5
The Monolith test bench

Установка для моделирования деформации и разрушения крупногабаритных образцов (рис. 5). Стенд «Монолит» мощностью 150 т работает с образцами 1 размерами 500x500x500 мм, в которых выполняют полости 2, 3, аналогичные выработкам при техногенном внедрении. Деформирование и разрушение образца и его отдельных зон фиксируются приборами фото-, видеосъемок, сейсмическими приборами 4 и типовыми датчиками нагрузок-деформаций.

Заключение

Сотрудники ВНИМИ уже сегодня озабочены проблемами, с которыми столкнется горная практика при достижении глубин свыше 1,5 км. Недавно было установлено экспериментально [12; 13], что на этих глубинах породы приобретают особые свойства, которые выражаются в:

- аномальной хрупкости;
- способности к спонтанному разрушению при низких сдвиговых напряжениях;
- аномально высоком выделении упругой энергии при разрушении.

Эти аномальные свойства вызывают мощные глубинные горные удары (сейсмически не отличимые от землетрясений)

в результате создания спонтанных динамических разломов в цельных горных породах, окружающих выработку. Для изучения аномальных запредельных свойств горных пород в условиях больших глубин необходимы нагружающие системы нового поколения. Во ВНИМИ ведутся работы в этом направлении.

Список литературы / References

1. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. *Пластичность горных пород*. М.: Недра; 1976.
2. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г., Певзнер Е.Д. *Гидропривод к прессу для испытания образцов на прочность*. Патент. №785680.
3. Карманский А.Т. Методика исследования горных пород при сложных напряженных состояниях с учетом газового фактора. В кн.: *Борьба с горными ударами*. Л.: ВНИМИ; 1981. С. 27–30.
4. Лодус Е.В. Влияние скорости деформирования и видов напряженного состояния на запредельные характеристики удароопасных и выбросоопасных горных пород. В кн.: *Региональные меры предотвращения горных ударов*. Л.: Недра; 1983. С. 35–39.
5. Петухов И.М., Линьков А.М. *Механика горных ударов и выбросов*. М.: Недра; 1983. 280 с.
6. Ставрогин А.Н., Певзнер Е.Д., Тарасов Б.Г., Ширкес О.А. Универсальная установка для исследования механических и фильтрационных свойств горных пород в условиях сложных напряженных состояний. В кн.: Ставрогин А.Н. (ред.) *Физика и механика разрушения горных пород*. Фрунзе: Илим; 1983. С. 2–12.
7. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. *Механика деформирования и разрушения горных пород*. М.: Недра; 1992. 224 с.
8. Ставрогин А.Н. Тарасов Б.Г. *Экспериментальная физика и механика горных пород*. СПб.: Недра; 2001. 342 с.
9. Лодус Е.В. Напряженное состояние и релаксация напряжений в горных породах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1986;(2):3–11.
Lodus E.V. The stress state and stress relaxation in rocks. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1986;(2):3–11. (In Russ.)
10. Ставрогин А.Н., Георгиевский В.С., Лодус Е.В. Влияние атмосферной влажности на ползучесть солевых горных пород. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1975;(1):75–77.
Stavrogin A.N., Georgievskii V.S., Lodus E.V. Impact of atmospheric humidity on the creep behaviour of saline rocks. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1975;(1):75–77. (In Russ.)
11. Петухов И.М., Лодус Е.В., Линьков А.М. Влияние скорости подачи добычной машины на опасность проявления горных ударов. *Безопасность труда в промышленности*. 1985;(5):43–46.
Петухов И.М., Лодус Е.В., Линьков А.М. Effect of mining machine advance rate on the rock bump hazard. *Occupational Safety in Industry*. 1985;(5):43–46. (In Russ.)
12. Tarasov B.G. New physics of supersonic ruptures. *Deep Underground Science and Engineering*. 2023;2(3):207–244. <https://doi.org/10.1002/dug2.12050>
13. Tarasov B.G. Fan-hinged shear instead of frictional stick–slip as the main and most dangerous mechanism of natural, induced, and volcanic earthquakes in the earth’s crust. *Deep Underground Science and Engineering*. 2023;2(4):305–336. <https://doi.org/10.1002/dug2.12052>

Информация об авторах

Лодус Евгений Васильевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией физико-механических свойств горных пород, АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Тарасов Борис Григорьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: info@vnimi.ru

Information about the authors

Evgeniy V. Lodus – Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory of Physical and Mechanical Properties of Rocks and Soils, VNIMI JSC, St. Petersburg, Russian Federation

Boris G. Tarasov – Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Associate, VNIMI JSC, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: info@vnimi.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 18.05.2024

Поступила после рецензирования: 18.06.2024

Принята к публикации: 01.07.2024

Article info

Received: 18.05.2024

Revised: 18.06.2024

Accepted: 01.07.2024