

УДК 622.02:531

EDN: CVTYDH

*Литвинский Г. Г.**Донбасский государственный технический университет**E-mail: Ligag@ya.ru*

ТРАЕКТОРИИ ИСПЫТАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В СТАБИЛОМЕТРЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПАСПОРТА ПРОЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕФОРМАЦИОННОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ

Получение достоверных и полных данных о физико-механических свойствах грунтов и горных пород основано на использовании сложного лабораторного оборудования, в первую очередь — стабилометров. Проанализированы различные их конструкции для грунтов и горных пород и возможные программы испытаний образцов при многоосном осесимметричном и разнокомпонентном (3D) их нагружении. Рассмотрена классификация траекторий нагружения образцов в стабилометре по параметру Надаи — Лоде. Разработана новая конструкция жесткого стабилометра для осесимметричного (в том числе по схемам Кармана и Бекера) многоосного нагружения образцов цилиндрической формы. Выполнен анализ закономерностей проявления деформационного эффекта памяти в циклах «нагрузка-разгрузка» образца. Предложена методика получения всего многообразия паспортов прочности на восходящей нелинейной и запредельной ветвях полной диаграммы нагружения с использованием единичного образца породы.

Ключевые слова: *горные породы, грунты, физико-механические свойства, многоосное нагружение, стабилометры, параметр Надаи — Лоде, траектории нагружения, полная диаграмма нагружения, деформационный эффект памяти, методика испытаний, многообразие паспортов прочности породы.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В условиях интенсификации добычи и переработки сырьевых ресурсов все более возрастает значение оперативного получения и интерпретации исходных данных о состоянии и свойствах горных пород, слагающих горный массив, в котором ведутся горноинженерные работы.

С позиций геомеханики, которая изучает, объясняет и прогнозирует поведение массива горных пород при разнообразных на него силовых и деформационных воздействиях, в первую очередь необходимо получить достоверные и представительные исходные данные о наиболее полном перечне физико-механических свойств горных пород. Без этих данных оказываются невозможными проектирование, строительство и эксплуатация любого горного сооружения или предприятия.

По мере развития теории геомеханических интерпретаций происходящих в горном массиве процессов деформирования и

разрушения происходят постоянные изменения методов, способов и приборов экспериментальных исследований. Последние должны дать все более разнообразные и подробные сведения о деформационных и прочностных показателях для массива и слагающих его пород. Именно эти задачи и призваны обеспечить лабораторные методы их механических испытаний.

К концу XX в. и вплоть до настоящего времени заметно усилился интерес горных специалистов и геомехаников к описанию процессов запредельного деформирования горных пород [1–7 и др.], поскольку многие проблемы устойчивости горных пород в окрестности подземных и открытых разработок связаны с переходом пород в частично или полностью разрушенное состояние, которое называют запредельным.

Полная диаграмма деформирования и разрушения горных пород при одноосных испытаниях позволяет судить о поведении пород на разных этапах их разрушения, однако эта информация является недостаточной.

Чтобы получить экспериментальные данные о поведении пород при многоосном нагружении, включая предельное их состояние, уже более века используют так называемые стабилометры. Последние представляют собой лабораторный прибор в виде нагрузочного устройства для создания трехосного сжатия образцов из естественных (грунты и горные породы) и искусственных (бетон, керамика и др.) материалов с целью определения их физико-механических свойств при изменяемом по заданной программе состоянии (напряжении, деформации, температуре, водо- и газонасыщении, пористости, микродефектах, неоднородностях, анизотропии и пр.).

Стабилометры и испытательные системы на их основе были разработаны в ответ на запросы практики о необходимости изучения физико-механических свойств грунтов и горных пород при проектировании и ведении наземного и подземного строительства. В соответствии с областью использования и целями испытаний стабилометры имеют различную конструкцию и назначение в зависимости от типа образца, его происхождения и требований методики проведения испытаний. Благодаря трехосным испытаниям образцов в стабилометрах, были изучены процессы деформирования и разрушения многих материалов, открыты новые эффекты и явления (пинч-эффект Бриджмена [8, 9], акустический эффект Кайзера [10, 11] и др.).

Обычно для испытания образцов грунта в стабилометрах в условиях трехосного сжатия повсеместно применяют различные механические устройства, в которых нагружение образцов производится с помощью веса грузов, давления воздуха или жидкости. Для измерения смещений используют индикаторы часового типа с точностью отсчета 0,01 в диапазоне 0–10 мм или 0,001 в диапазоне 0–3 мм.

Стабилометры подразделяют на обычные, в которых испытывают цилиндрические образцы под действием трехосного осесимметричного сжатия $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, и

специальные с образцами кубической формы — для создания произвольного («истинного») не равнокомпонентного трехосного сжатия в образцах $\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$, где $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ — действующие на образец главные нормальные напряжения в порядке их убывания (рис. 1). Стабилометры для создания трехосного растяжения пока не разработаны.

Траектория нагружения образцов производится чаще всего по схеме Кармана [1], когда создаваемое в образце объемное напряженное состояние подчиняется условию

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3, \quad (1)$$

где σ_1 — максимальное главное напряжение, приложенное по оси симметрии, Па; σ_2, σ_3 — минимальные главные напряжения, действующие на боковые стенки, Па.

По сути, стабилометр работает, как и все нагрузочные машины, в режиме заданных породному образцу контролируемых нагрузок, которые либо возрастают до назначаемого уровня или убывают, что происходит (для заданного сочетания напряжений) в пределах максимальной до его разрушения несущей способности образца.

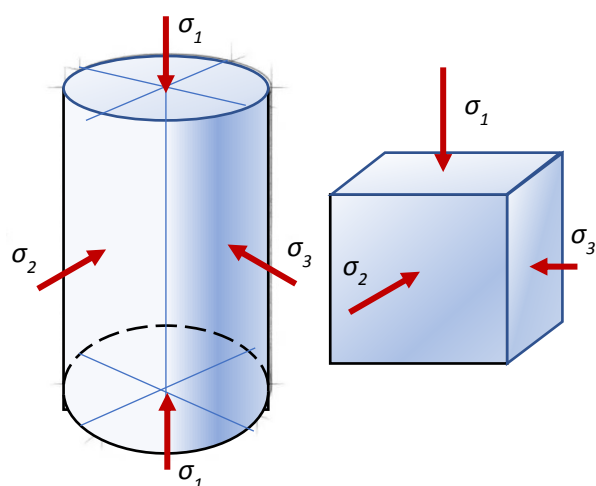


Рисунок 1 — Образцы цилиндрической и кубической формы для стабилометрических испытаний и действующие на них напряжения

Однако все известные типы стабилометров мало приспособлены к осуществлению режимов задаваемых образцу деформаций, когда требуется определение таких важных показателей прочности, как остаточная несущая способность породы при деформировании после достижения предела прочности [1].

В качестве источника нагрузки в испытательных машинах и прессах для механических испытаний пород используются [3]:

а) для *грунтов и слабых пород* с нагрузкой до 50 кН:

- винтовой механический привод, работающий в режиме задаваемых деформаций с постоянной скоростью;

- рычажные устройства с грузовым приводом, обеспечивающие режим постоянных задаваемых нагрузок;

- пружинные устройства, использующие в качестве привода потенциальную энергию упругого сжатия пружин и создающие режим задаваемых нагрузок;

б) для *скальных пород* с необходимым давлением 50 МПа и более:

- гидростатический привод от насосов с регулируемым давлением;

- привод от гидроаккумуляторов, поддерживающих задаваемые нагрузки на образец.

Необходимость использования для скальных пород сложных и громоздких нагрузочных приспособлений, обеспечивающих нужный характер передачи нагрузки, требует для проведения испытаний образцов специальных помещений и делает затруднительным, а часто и невозможным, их оперативное применение в полевых условиях или на месте производства работ.

Кроме того, получение показателей поведения породы в предельном состоянии привело к необходимости почти повсеместного применения сложного и дорогостоящего сервопривода для управления силовым и деформационным нагружением образцов.

Поэтому актуальной задачей является разработка стабилометра простой конструкции и доступной мобильности, который обеспечит возможность испытания скальных пород для получения полной

диаграммы деформирования при жестких режимах нагружения и разных траекториях трехосного силового воздействия.

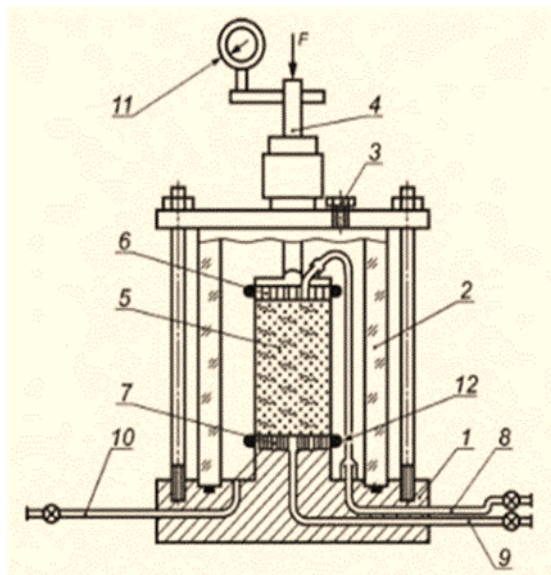
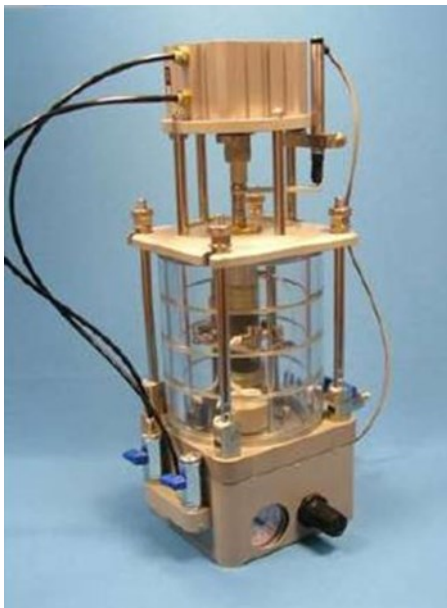
Для составления программы испытаний целесообразно рассмотреть и систематизировать наиболее востребованные траектории нагружения образцов в стабилометре с целью получения не только статических, но и реологических показателей поведения материала.

1 Особенности испытания грунтов и горных пород

Испытания грунтов (дисперсных и несвязных) и горных пород (скальных грунтов) различаются способами отбора и подготовки образцов для испытаний, перечнем определяемых показателей (характеристик) физико-механических свойств, лабораторным оборудованием, методиками проведения и обработки результатов испытаний [12].

Поскольку грунт является многокомпонентной динамичной системой из скелета и находящихся в его поровом пространстве жидкостей и газов, при испытаниях необходимо конструктивно воссоздать естественное давление поровой жидкости и напряженно-деформированное состояние грунта, что заставляет изучить водно-физические его свойства с учетом изменения давления и количества флюидов в порах грунта. Конструкция обычного стабилометра для испытаний дисперсных и мерзлых грунтов путем создания осесимметричного напряженно-деформированного состояния в цилиндрическом образце показана на рисунке 2.

Стабилометр состоит из испытательной камеры в виде корпуса 2 и основания 1, в которую помещен образец грунта 5 в изолирующей оболочке между верхним 6 и нижним 7 штампами с уплотнительным кольцом 12. К ним подведены магистрали 8, 9 системы дренажа поровой жидкости и измерения ее порового давления и противодавления. Через основание 1 камеры подведены магистрали давления 10, системы дренажа и противодавления 8, 9. Со штоком 4 взаимодействует индикатор вертикальных перемещений 11.



1 — основание камеры; 2 — корпус камеры; 3 — вентиль выпуска воздуха; 4 — шток; 5 — образец грунта в оболочке; 6, 7 — верхний и нижний штампы; 8, 9 — магистрали системы дренажа, противодействия и измерения порового давления; 10 — магистраль давления в камере; 11 — индикатор перемещений; 12 — уплотнительное кольцо; F — нагрузка

Рисунок 2 — Общий вид и схема стабилометра для испытаний грунтов методом трехосного сжатия по ГОСТ 12248-2010

Испытания проводят путем увеличения вертикального полного напряжения σ_1 вплоть до разрушения образца при фиксированном значении полных горизонтальных напряжений $\sigma_2 = \sigma_3$ с возможностью полного бокового расширения образца грунта цилиндрической формы в условиях осесимметричного статического нагружения $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$.

Характеристики грунтов природного сложения и искусственного происхождения должны определяться на основе их непосредственных испытаний в полевых или лабораторных условиях с учетом возможного изменения влажности грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений. Для определения прочностных характеристик грунтов, для которых прогнозируется повышение влажности, образцы грунтов предварительно насыщают водой до значений влажности, соответствующих их естественному состоянию или прогнозу.

2 Стабилометры для горных пород

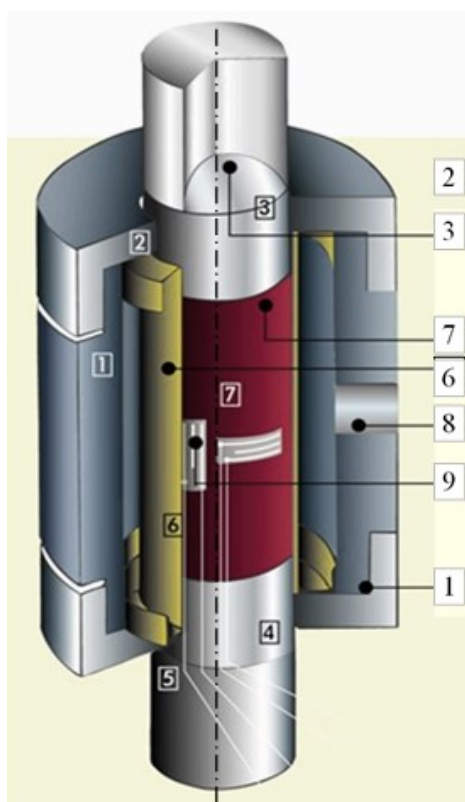
Процедура испытания образцов горных пород в современных стабилометрах состоит в следующем. Для трехосного испытания (рис. 3) цилиндрический образец породы 7 покрывают герметичной резиновой оболочкой 6 и помещают в камеру 1 стабилометра Хука (Hoek cell).

Образец помещается между цилиндрическими шайбами 5, которые центрируются с пуансонами 3 и 5. На цилиндрическую поверхность образца 7 через впускное отверстие 8 подают масло и создают гидростатическое давление в камере 1 гидронасосом с серводвигателем. Последний поддерживает давление с точностью до 1 %.

Осевая нагрузка на образец через пуансоны 3, 5 и шайбы 4 устройства передается от пресса с сервоуправлением, которое обеспечивает постоянную скорость нагружения в осевом и радиальном и направлениях. При достижении радиальной нагрузки заданного значения, она фиксируется, а

осевую нагрузку повышают вплоть до начала снижения прочности образца и его разрушения. Для определения вертикальной и окружной деформации образца используют тензометрические датчики.

Устройство нагружения на пуансон 3 должно быть достаточно жестким и обеспечивать необходимое максимальное давление для разрушения образца породы. После проведения по меньшей мере трех трехосных испытаний при различных боковых давлениях наносятся на график наиболее подходящие огибающие выбранного критерия и выводятся параметры каждого из них (сцепление, угол трения и др.).



1 — корпус камеры; 2 — крышка камеры; 3 — сферический пуансон; 4 — центрирующая шайба; 5 — пуансон; 6 — герметичная гибкая оболочка; 7 — образец породы; 8 — выпуск масла

Рисунок 3 — Стабилометр для трехосных испытаний пород конструкции Хука (Hoek cell)¹

3 Траектории нагружения образцов в стабилометре

Возможны два случая нагружения образцов грунта в условиях трехосного сжатия: простое и сложное. Простое (пропорциональное) нагружение характеризуется тем, что компоненты напряжения возрастают в течение опыта пропорционально одному параметру (как правило, времени t ; при этом форма тензора напряжений и его главные направления все время остаются неизменными. При сложном нагружении направления главных осей и соотношения главных напряжений могут изменяться. Эти понятия были введены великим русским ученым-механиком, профессором Московского государственного университета А. А. Ильюшиным (1911–1999).

Опыты с простым нагружением реализуются в обычных стабилометрах на цилиндрических образцах (рис. 3), а со сложным — в стабилометрах истинного трехосного сжатия (TTTU — true triaxial test unit) на кубических образцах (рис. 1) или в приборах с кручением в трубчатых образцах. Для описания траектории нагружения образцов при их испытании удобно использовать безразмерный нормированный параметр Надаи — Лоде:

$$\mu_{\sigma} = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (-1 \leq \mu_{\sigma} \leq 1). \quad (2)$$

Параметр Надаи — Лоде μ_{σ} не изменяется при наложении на заданное напряженное состояние образца произвольной величины шарового тензора напряжений $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, т. е. при всестороннем растяжении или сжатии. Траектории нагружения образцов при их испытаниях называются подобными, если их параметры Надаи — Лоде одинаковы.

При выполнении условия $\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$ напряженное состояние в образце называют

¹<https://www.geoengineer.org/education/laboratory-testing.com/triaxial-compression-test-in-rock>

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

обобщенным растяжением, и параметр Надаи — Лоде $\mu_\sigma = 1$; если $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$, то реализовано обобщенное сжатие $\mu_\sigma = -1$, а при траекториях нагружения с соблюдением условия $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ образец нагружен обобщенным сдвигом $\mu_\sigma = 0$.

В стабилометре можно проводить испытание образцов по следующим траекториям изменения главных напряжений с увеличением $dV/d\sigma_0 > 0$ или уменьшением $dV/d\sigma_0 < 0$ обжатия образца. Если систематизировать наиболее востребованные схемы нагружения образцов по соответствующим им траекториям изменения их напряженно-деформированного состояния, то получим их обобщение в следующем виде (табл. 1).

Эти идеализированные схемы и траектории нагружения далеко не исчерпывают всего возможного многообразия воспроизводимых схем в стабилометре, однако появление особых комбинаций и последовательностей приведенных в таблице 1 базовых траекторий требует дополнительного обоснования, вытекающего из поставленных задач исследований.

4 Стабилометры для истинного трехосного нагружения

Наиболее полная информация о свойствах горных пород предоставляется при использовании устройств истинного трехосного нагружения (ТТТУ — True triaxis test unit), которые пока не получили широкого распространения. В отличие от обычных стабилометров, в которых проводятся испытания цилиндрических образцов грунта (породы) в условиях осесимметричного обобщенного сжатия $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, разработаны стабилометры с истинным трехосным сжатием с произвольно заданным соотношением главных напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$, для чего испытания необходимо проводить на образцах кубической формы (рис. 1). Они позволяют более глубоко изучать процессы деформирования и разрушения материалов с целью прогнозирования их поведения в самых сложных условиях нагружения при независимом контроле всех напряжений и деформаций.

Таблица 1

Траектории изменения напряженного состояния образцов в стабилометре

| Тип нагружения | параметр Надаи — Лоде | Обжатие образца | Траектория главных напряжений |
|--|---|----------------------------|--|
| Обобщенное сжатие (схема нагружения Кармана) | $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, $\mu_\sigma = -1$ | $\frac{dV}{d\sigma_0} < 0$ | $\sigma_1 = \uparrow$, $\sigma_2 = \sigma_3 = Const$ |
| | | $\frac{dV}{d\sigma_0} > 0$ | $\sigma_1 = Const$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \downarrow$ |
| Обобщенное растяжение (схема нагружения Бекера) | $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, $\mu_\sigma = 1$ | $\frac{dV}{d\sigma_0} < 0$ | $\sigma_1 = \sigma_2 = \uparrow$, $\sigma_3 = Const$ |
| | | $\frac{dV}{d\sigma_0} > 0$ | $\sigma_1 = \sigma_2 = Const$, $\sigma_3 = \downarrow$ |
| Обобщенный сдвиг | $\sigma_1 > \sigma_2 =$ $= (\sigma_1 + \sigma_3)/2 > \sigma_3$, $\mu_\sigma = 0$ | $\frac{dV}{d\sigma_0} = 0$ | $\sigma_1 = \uparrow$, $\sigma_3 = \downarrow$, $\sigma_2 = Const =$ $= (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ |
| Гидростатическое сжатие (схема нагружения Паскаля) | $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, $\mu_\sigma = 1$ | $dV < 0$ | $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \uparrow$ |
| | | $dV > 0$ | $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \downarrow$ |

Исследования в стабилометрах истинного трехосного сжатия начали проводить с середины 30-х гг. прошлого столетия (Н. Н. Давиденков, Г. Кельман (G. Kjelman), Г. М. Ломизе, А. Л. Крыжановский и др.). Такого рода стабилометры разных конструкций были разработаны отечественными учеными во ВНИМИ, б. ИГД им. А. А. Скочинского, ИФЗ АН СССР, в ФТИ (г. Донецк), во Фрайберской горной академии (ГДР). Сложность и громоздкость конструкции этих приборов при тогда еще недостаточно развитых приборной базе и теоретических обоснованиях не позволили им получить широкое распространение.

Обширное число проблем при добыче ископаемых ресурсов вызвало необходимость решения еще большего количества научных теоретических и прикладных задач и породило большое разнообразие конструкций стабилометров, каждую из которых можно считать уникальной. В настоящее время бурное развитие исследований пород с помощью стабилометров ведется командами ученых во многих ведущих лабораториях развитых горнодобывающих стран (Австралия, Бельгия, Индия, Канада, Китай, Япония и др.).

Параметры стабилометров при этом, в зависимости от поставленных задач, варьируются в широких пределах. Тем не менее каждый стабилометр трехосного истинного сжатия состоит из трех взаимно перпендикулярных гидравлических поршней, образующих своими квадратными торцами плит замкнутую камеру, куда помещают кубический образец породы для испытаний. Как правило, для уменьшения трения перед испытанием к нагружающим поверхностям гидравлических поршней прикрепляют листы тефлона (толщиной 0,1 мм) с силиконовой смазкой. Размер образца в некоторых стабилометрах достигает 700 мм, на каждом поршне предусмотрено давление до 500 МПа, а нагрузка доходит до 5...10 МН и более.

При проведении испытаний проводят измерения не только напряжений и деформаций в образце, но и определяют

многочисленные дополнительные параметры в зависимости от специфики поставленных целей исследований:

- упругие и пластические свойства горных пород на разных участках траектории их нагружения;

- измерение закономерностей фильтрации жидкости при разных давлениях на образец с целью определения трехмерной направленной проницаемости ее коэффициентов по каждой грани образца;

- изучение влияния больших глубин и изменения напряженного состояния массива на поведение горных пород;

- особенности развития микро- и мезотрещин в породах при смене траектории нагружения образца;

- отслеживание типов и размеров трещин в горных породах, вызванных региональной сейсмической активностью;

- параметры фильтрации жидкости через образец в трех направлениях, для чего в контактных плоских поверхностях пуансонов в виде жестких плит выполнены отверстия, через которые жидкость подается к граням образца посредством насоса;

- определение скорости высокочастотных продольных и поперечных волн и акустической эмиссии при деформировании и разрушении образца с помощью пьезоэлектрических датчиков, закрепленных на жестких плитах пуансонов и находящихся в непосредственном контакте с поверхностью граней образца;

- исследование влияния на упругие и деформационные свойства образца изменения температуры в процессе его нагружения, причем пластины пуансонов оснащены системой контроля температуры, позволяющей нагревать образец от отрицательных до высоких положительных (свыше 200...300 °С) температур.

В соответствии с этими задачами широко используются различные датчики и комплекты аппаратуры:

- система шлифования граней образца, обеспечивающая их перпендикулярность с точностью не менее 5 микрон;

– системы создания, контроля и регистрации скоростей ультразвуковых волн, а также создания и приема акустических импульсов, возникающих из-за образования и роста микротрещин с одновременной регистрацией полного спектра акустической эмиссии по всем трем осям нагружения образца (одно вертикальное и два горизонтальных направления) с помощью установленных на нем комплектов пьезоэлектрических датчиков;

– блок охлаждения и нагрева образца в требуемом диапазоне отрицательных (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) и положительных (до $300\dots 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур при непрерывном их контроле и стабилизации;

– аппарата для проведения экспериментов по гидроразрыву пласта в условиях моделирования пересечения различных пластов пород буровой скважиной и др.

В качестве удачного примера может служить уникальная трехосная испытательная система для создания неравнокомпонентных нагрузок на образец (TILTS — Triaxial

independent loading test system), созданная в Институте проблем механики АН СССР (рис. 4) еще в 1980 гг. и предназначенная для изучения деформаций, прочностных и фильтрационных характеристик пород рудных, угольных, нефтяных и газовых месторождений.

Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН) представляет собой уникальный исследовательский комплекс, позволяющий изучать деформационные, прочностные и фильтрационные свойства горных пород. На образцах породы кубической формы с гранью 40 или 50 мм можно воссоздавать любые напряженные состояния, а примененная в конструкции нагружающего узла оригинальная кинематическая схема позволяет нажимным плитам сближаться в трех направлениях, не создавая препятствия друг другу, что дает возможность приложения нагрузки по всей площади грани образца и создания в нем однородного напряженного состояния (рис. 5).



Рисунок 4 — Трехосная испытательная система для создания неравнокомпонентных нагрузок на образец (Triaxial independent loading test system — TILTS)²

²[https:// doi.org/10.1007/978-3-030-26608-0_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26608-0_4)

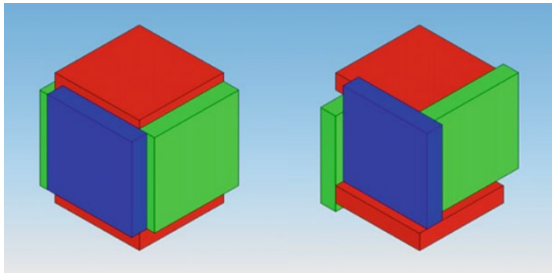


Рисунок 5 — Нажимные плиты стабилометра в исходном положении и после деформации образца

Установка позволяет в лабораторных условиях моделировать реальные геомеханические процессы, происходящие в продуктивном пласте при проведении различных технологических операций.

5 Разработка стабилометра жесткого нагружения

Ввиду необходимости проведения обширных изыскательских работ при промышленном, транспортном и гражданском строительстве возникает потребность получения достоверной информации о свойствах грунтов и горных пород в условиях, близких к полевым, или же непосредственно на месте производства работ. Поскольку сложные испытательные комплексы с сервоуправлением и автоматикой по нагружению образцов использовать в полевых условиях крайне затруднительно, целесообразно применять более простые и мобильные энергонезависимые установки со стабилометрами, которые несложно размещать и перемещать в специализированном автотранспорте (передвижной лаборатории для испытания материалов).

Для этих целей разработан стабилометр сверхжесткого нагружения, который позволяет определить деформационно-прочностные показатели горных пород в режимах осесимметричных «мягкого» (заданные нагрузки) или «жесткого» (заданные деформации) нагружений образцов по схемам соответственно таблице 1:

1 — Обобщенное сжатие (Кармана):

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3, \mu_\sigma = -1;$$

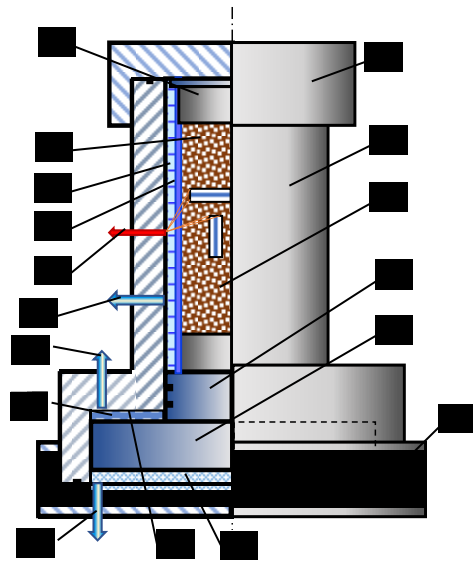
2 — Обобщенный сдвиг:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 > \sigma_3, \mu_\sigma = 0;$$

3 — Обобщенное растяжение (Бекера):

$$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3, \mu_\sigma = 1.$$

Отличием этого стабилометра (рис. 6) является наличие двухступенчатого поршня 4 двустороннего действия, формирующего три камеры: рабочую 8, отпорную 14 и нагрузочную 15. Поршень 4 обеспечивает многократное умножение осевой силы на образец 3 за счет разности диаметров ступени 5 и образца, равное $k = (D_5/d_0)^2$. Если принять диаметр образца $d_0 = 50$ мм, а поршня $D_5 = 200$ мм, то при давлении рабочей жидкости $p = 30$ МПа в нагрузочной камере 15 верхний предел давления на образец 3 составит 480 МПа, чего вполне достаточно для испытаний самых прочных горных пород.



1 — верхняя крышка; 2 — корпус;
3 — цилиндрический образец;
4 — двухступенчатый поршень; 5 — отпорная ступень поршня; 6 — нижняя крышка; 7 — шайба-проставка; 8 — камера радиального обжатия; 9 — гибкая изоляция; 10 — выходы тензометрии; 11, 12, 13 — магистрали управления давлением и расходом жидкости в камерах; 14, 15 — отпорная и нагрузочная камеры поршня 4

Рисунок 6 — Стабилометр жесткого нагружения образцов

Жесткость стабилометра достигается за счет применения вместо масла малосжимаемых жидкостей с высоким изотермическим модулем упругости: в опорной камере 14 противодавление создается ртутью (сжимаемость меньше, чем у воды, в 20 раз), а в рабочей камере 8 используется глицерин (сжимаемость меньше в 2,6 раза). В качестве источника нагрузки используют газовый баллон с высоким (30...50 МПа) давлением газа (воздух, азот и пр.). Такая конструкция стабилометра проста в обслуживании и достаточно мобильна.

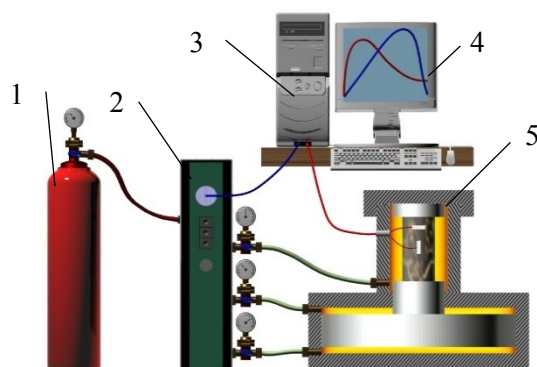
Стабилометр предназначен для испытаний строительных материалов и горных пород в условиях многоосного нагружения при произвольных законах изменения нагрузки и деформации, особенно для изучения закономерностей деформирования и разрушения материалов, в том числе и на участке предельных деформаций даже самых хрупких пород в жестком режиме их нагружения.

Испытательная установка может быть снабжена автоматизированной системой (не показана), способной управлять силовыми и деформационными параметрами нагружения в широком диапазоне изменения амплитуд и их скоростей. Силы измеряют тензодатчиками, а перемещения — индуктивными датчиками, все данные измерений в реальном режиме времени поступают на компьютер и обрабатываются в удобном для последующего анализа виде.

Общий вид измерительного оборудования для проведения объемных испытаний горных пород представлен на рисунке 7.

6 Паспорт прочности горных пород и деформационный эффект памяти

К числу наиболее часто формулируемых требований при ведении физико-механических испытаний горных пород относится получение их паспорта прочности, т. е. огибающей предельных кругов напряжений диаграммы О. Мора, в которой объединена информация о показателях прочности на одноосное сжатие, растяжение, а также при произвольном ее напряженно-деформированном состоянии.



- 1 — баллон сжатого газа; 2 — блок управления давлениями в камерах стабилометра;
- 3 — блок обработки экспериментальных данных;
- 4 — блок визуализации и вывода данных;
- 5 — стабилометр жесткого нагружения

Рисунок 7 Набор испытательного оборудования для определения паспорта прочности горных пород

Для определения огибающей паспорта прочности горной породы следует путем ее испытания в стабилометре получить несколько последовательно расположенных предельных кругов на диаграмме О. Мора. Как правило, число испытаний, отражаемых соответствующими предельными кругами на диаграмме, должно быть не менее числа прочностных параметров в формуле, которой описывается та или иная теория прочности.

Так, согласно аналитической теории прочности [13], паспорт прочности горных пород подчиняется зависимости с тремя параметрами, определяемыми экспериментально:

$$\tau_{nt} = \tau_0 \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0} + 1 \right)^\alpha \sigma, \quad (2)$$

где τ_{nt} , σ_n — касательное и нормальное напряжения на площадке разрушения, МПа;

τ_0 , σ_0 — когезии соответственно сдвига и разрыва породы, МПа;

α — параметр хрупкости, $0 \leq \alpha \leq 1$.

Отсюда следует, что для построения паспорта прочности необходимо провести не менее трех испытаний породы в стабилометре, а для повышения достоверности их число должно быть значительно больше.

Это требует значительных затрат времени и средств для подготовки соответствующего числа идентичных образцов их последовательного испытания.

На рисунке 8 показана на диаграмме О. Мора последовательность четырех испытаний породы в виде кругов, сдвинутых в сторону возрастания напряженно-деформированного состояния от одноосного до объемного. Такие испытания можно произвести по разным траекториям нагружения с различными параметрами Надаи — Лоде (схемы Кармана $\mu = -1$, обобщенный сдвиг $\mu = 0$ и Бекера $\mu = 1$). На предельной огибающей помечены и пронумерованы точки ее касания с кругами О. Мора.

Однако можно воспользоваться уникальным свойством твердых материалов сохранять в том или ином виде информацию о ранее оказанных на него физических воздействиях в виде инструментально различимых следов измененных свойств и состояний. Свойство сохранения во времени изменений показателей свойств и состояний материала, вызванных предшествующими физическими воздействиями, принято называть эффектом памяти [14].

В настоящее время различают разнообразные эффекты памяти: деформационный, ультразвуковой, акустоэмиссионный, электромагнитный эмиссионный, электрический, магнитный, термоэмиссионный и др. [11]. Все эти эффекты памяти характеризуются тем, что если материал на предыдущем цикле нагружения был подвергнут некоторому физическому воздействию, которое вызвало в нем определенный уровень отклика (функцию) в виде изменения показателя состояния или свойства, то при повторном физическом воздействии в момент перехода к ранее достигнутому максимальному значению показателя происходит изменение (перегиб, скачок, отклонение) плавной кривой его функциональной зависимости от аргумента. Тем самым появляется возможность выявить (зафиксировать) ранее достигнутый (запомненный) граничный уровень показателя на предыдущем цикле нагружения.

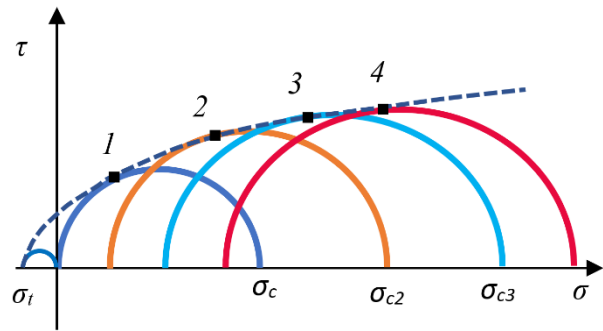


Рисунок 8 — Построение паспорта прочности породы по четырем испытаниям ее образцов в стабилометре

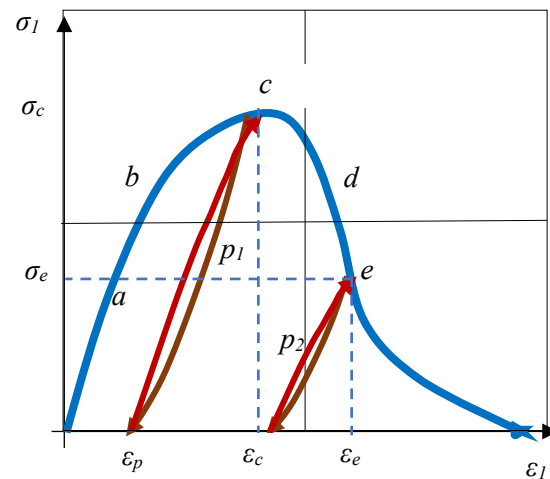


Рисунок 9 — Полная диаграмма σ – ε деформирования горной породы

В нашем случае важно использовать деформационный эффект памяти материала (горной породы) для построения паспорта прочности. Для этого рассмотрим полную диаграмму испытания горной породы, на которой традиционно выделяют несколько характерных участков (рис. 9).

Начальный участок нагружения *a* является линейным, где действует закон Гука и не происходит необратимых изменений внутренней структуры материала. Далее следует участок *b* нелинейной зависимости σ – ε из-за появления остаточных деформаций, обусловленных необратимыми пластическими микродефектами, рассеянными по всему объему материала. Именно их возникновение и рост вызывает многочисленные физи-

ческие эффекты: акустическую эмиссию, электромагнитное излучение, повышение температуры, ультразвуковое излучение и др. Этот нелинейный участок достигает своего максимума в точке c , соответствующей пределу прочности материала на сжатие σ_c .

Если из точки σ_c выполнить цикл «разгрузка-нагрузка» в виде петли p_1 , т. е. снизить напряжение σ_1 , которое задает уровень внешней нагрузки, до нулевого значения, а затем вновь поднять нагрузку до уровня σ_1 , то можно сформулировать следующие закономерности (рис. 9):

– при разгрузке упругие деформации образца $\varepsilon_y = \varepsilon_c - \varepsilon_p$ будут сняты, но зафиксированы остаточные деформации ε_p , в которых оказываются «замороженными» все накопленные ранее неупругие неоднородности в виде микродефектов и повреждений материала — происходит проявление деформационного «эффекта памяти»;

– повторная нагрузка от 0 до уровня σ_1 по петле p_1 идет в виде упругой деформации образца $\varepsilon_y = \varepsilon_c - \varepsilon_p$ по закону Гука при отсутствии роста микродефектов и его сопровождающих физических эффектов, только после нагружения выше ранее достигнутого уровня напряжений σ_1 диаграмма повторного нагружения претерпевает резкий излом в точке σ_1 и вновь переходит на прежнюю до цикла p_1 траекторию нагружения;

– дальнейший путь деформирования по диаграмме нагружения сопровождается теми же физическими эффектами эмиссии, вызванными появлением новых микродефектов и накоплением вследствие этого остаточных деформаций материала;

– любой следующий цикл «разгрузки-нагрузки», например, по петле p_2 , в произвольной точке e полной диаграммы нагружения (рис. 9), закрепляет иной уровень полных деформаций ε_e , которые, в свою очередь, слагаются из упругой и неупругой компонент, при этом предыдущая неупругая компонента перекрывается новой, накопленной за счет появления микродефектов на участке ce полной диаграммы нагружения, и

это будет новый уровень деформационного эффекта памяти;

– отсюда следует, что после разгрузки образца на произвольном участке диаграммы нагружения фиксируется только тот уровень остаточных деформаций, который соответствует последнему этапу разгрузки, и это явление называют деформационным эффектом памяти;

– гидростатическое (всестороннее) нагружение или разгрузка материала на любом участке диаграммы нагружения не вызывают рост микродефектов и изменение внутренней структуры материала, а поэтому не сопровождается эмиссионными физическими эффектами.

Опираясь на эти теоретически предсказанные и экспериментально подтвержденные закономерности поведения материала при его нагружении в стабилметре, можем, за счет комбинирования последовательно чередующихся циклов нагрузки и разгрузки и гидростатического обжатия материала, получить многоэтапную траекторию нагружения материала, позволяющую построить его паспорт прочности.

Рассмотрим с этой целью одну из возможных простейших траекторий испытания образца, представленную на рисунке 10, которая осуществляется согласно таблице 1 по схеме Кармана (обобщенное сжатие $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ с коэффициентом Надаи — Лоде $\mu_\sigma = -1$).

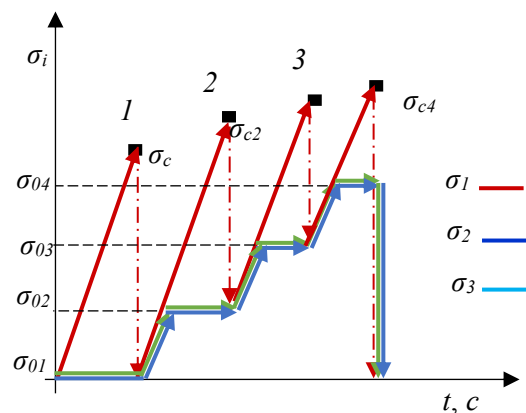


Рисунок 10 — Траектории напряжений в программе построения паспорта прочности горной породы

Проследим по рисунку 10 за последовательностью нагружения образца в стабилометре:

1) образец вначале подвергаем одноосному сжатию $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, повышая σ_1 вплоть до предела прочности $\sigma_1 = \sigma_c$ (точка 1 на рис. 10), т. е. когда на диаграмме нагружения будет достигнут максимум в точке c (рис. 9);

2) производим снижение σ_1 до исходного нулевого уровня σ_{01} и начинаем новый цикл нагружения образца, подвергая его сперва гидростатическому сжатию до уровня σ_{02} , а затем вновь повышая напряжение σ_1 до предела прочности σ_{c2} , $\sigma_1 = \sigma_c$ (точка 2 на рис. 10);

3) повторяем траекторию нагружения образца несколько раз, ступенчато увеличивая гидростатическое сжатие до возможного уровня повышения давления в стабилометре;

4) переносим экспериментально полученные данные максимальных значений σ_1 (точки 1...4 на рис. 10) с учетом уровня минимальных напряжений $\sigma_2 = \sigma_3$ на диаграмму О. Мора (рис. 8) и строим огибающую наибольших кругов напряжений, которая и будет искомым паспортом прочности (рис. 8).

Особо следует отметить, что после построения паспорта прочности образец остается в стабилометре готовым для дальнейших испытаний с использованием деформационного эффекта памяти. Для этого достаточно повторить ту же последовательность действий на любом последующем участке диаграммы нагружения (например, см. рис. 9, точка e). Впервые при проведении испытаний на одном образце можно построить не один паспорт прочности, а их семейство (многообразие) для разных участков диаграммы нагружения. Такие испытания способны дать экспериментальную базу для глубокого изучения и исследования сложных процессов структурных превращений роста и залечивания микродефектов, происходящих в твердом теле при его термосиловом нагружении.

Предложенная траектория нагружения образца в стабилометре — одна из множества возможных (см. табл. 1), однако ее достоинствами являются:

- достаточно простая реализация и минимизация затрат времени на испытания;
- обеспечение предельной сохранности структуры образца из-за ограниченности времени на развитие в образце процессов релаксации и ползучести при переходе от цикла к циклу нагружения;
- возможность использования того же образца для построения других паспортов прочности на последующих участках полной диаграммы испытаний и получения всего многообразия присущих материалу паспортов прочности.

Выводы:

- задачи разработки методик испытаний физико-механических свойств грунтов и горных пород тесно связаны с совершенствованием лабораторного оборудования для их реализации и являются весьма актуальными;
- одними из основных лабораторных приборов для определения свойств пород являются стабилометры, конструкции которых обеспечивают осесимметричное или разнокомпонентное многоосное (3D) нагружение образцов;
- программы испытаний образцов могут предусматривать различные траектории их нагружения, и в работе предложена их обобщенная классификация по параметру Надаи — Лоде и последовательности приложения нагрузки в стабилометре;
- рассмотрены конструкции современных стабилометров, их достоинства и недостатки, разработана новая конструкция жесткого стабилометра для осесимметричного (по схеме Кармана и Бекера) многоосного нагружения образцов цилиндрической формы;
- предложена методика проведения физико-механических испытаний горных пород в стабилометре, основанная на использовании закономерностей поведения горных пород и проявлений деформационного эффекта памяти на любом нелинейном участке

полной диаграммы нагружения, в том числе и на запредельной ее ветви, позволяющая построить всё многообразие их паспортов прочности на одном образце породы.

Задачи дельнейших исследований состоят в математическом описании

процессов структурных преобразований в породе при ее термосиловом нагружении с использованием дифференциальных уравнений роста и залечивания микродефектов в рамках реономной микромеханики деформирования и разрушения материалов.

Список источников

1. Karev V., Kovalenko Yu., Ustinov K. *Geomechanics of Oil and Gas Wells. Switzerland : Springer International Publishing Cham, 2020. 166 p. (Advances in Oil and Gas Exploration and Production).*
2. Бишон А. У. *Определение свойств грунтов в трехосных испытаниях. М. : Госстройиздат, 1961. 232 с.*
3. Болдырев Г. Г., Сидорчук В. Ф. *Определение механических свойств грунтов в компрессионном приборе с измерением боковых напряжений // Автоматизированные технологии изысканий и проектирование. 2003. № 9. С. 69–71.*
4. Lee H., Haimson B. *True triaxial strength, deformability, and brittle failure of granodiorite from the San Andreas Fault Observatory at Depth // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2011. Vol. 48. Iss. 7. P. 1199–1207. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.08.003*
5. Tarasov B., Potvin Y. *Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2013. Vol. 59. P. 57–69. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.011*
6. *True Triaxial Testing of Rocks / edited by M. Kwaśniewski, X. Li, M. Takahashi. London : CRC Press, 2012. 384 p. (Geomechanics Research Series 4).*
7. *Ориентационная природа эффекта деформационной памяти при трехосном циклическом неравнокомпонентном сжатии песчаника / Пантелеев И. А. [и др.] // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер. : Физ.-мат. науки. 2022. Т. 26. № 2. С. 293–310. EDN MMKNTJ. DOI: 10.14498/vsgtu1890*
8. Бриджмен П. У. *Физика высоких давлений. М. — Л. : ОНТИ, 1935. 402 с.*
9. Литвинский Г. Г. *Пинч-эффект при разрушении породы клиновым горным инструментом // Сб. науч. трудов ДонГТУ. 2018. Вып. 9 (52). С. 5–20. EDN XYEIQP*
10. *Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurements in a rock mass / Y. L. Filimonov, A. V. Lavrov, Y. M. Shafarenko, V. L. Shkuratnik // Rock Mech. and Rock Enging. 2001. Vol. 34. Iss. 4. P. 275–291.*
11. *Lavrov A. Kaiser effect observation in brittle rock cyclically loaded with different loading rates // Mech. Mater. 2001. Vol. 33. P. 669–677. EDN KDMDQN. DOI: 10.1016/S0167-6636(01)00081-3*
12. *ГОСТ 12248.3. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. М. : Стандартинформ, 2020. 27 с.*
13. *Литвинский Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. Донецк : Норд-Пресс, 2008. 207 с.*
14. *Лавров А. В., Шкурятник В. Л., Филимонов Ю. Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. М. : МГТУ, 2004. 437 с.*

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ГЭС ДонГТУ Корнеевым С. В., к.т.н., доц. каф. ГиПБ, проректором по цифровой трансформации и образовательной деятельности ДонГТУ Шульгиным П. Н.

Статья поступила в редакцию 01.04.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Литвинский Гарри Григорьевич, д-р техн. наук, профессор каф. геотехнологии и промышленной безопасности
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,
e-mail: ligag@ya.ru

Litvinsky G. G. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia, e-mail: ligag@ya.ru)

ROCKS TESTING TRAJECTORIES IN THE STABILOMETER TO OBTAIN A STRENGTH CERTIFICATE USING THE DEFORMATION MEMORY EFFECT

Obtaining reliable and complete data on the physical and mechanical properties of soils and rocks is based on the use of sophisticated laboratory equipment, firstly stabilometers. Their various designs for soils and rocks and possible testing programs for samples under multiaxial axisymmetric and multi-component (3D) loading are analyzed. Classification of specimen loading trajectories in the stabilometer according to the Nadai — Lode parameter is considered. A new design of a rigid stabilometer for axisymmetric (including Karman and Becker schemes) multiaxial loading of cylindrical specimens is developed. The regularities of manifestation of deformation memory effect in the “load-unload” cycles of the specimen are analyzed. The methodology of obtaining the full range of strength passports on the ascending non-linear and forbidden branches of the full load diagram using a single rock sample is proposed.

Key words: rocks, soils, physical and mechanical properties, multiaxial loading, stabilometers, Nadai — Lode factor, load trajectories, complete loading diagram, deformation memory effect, test methods, variety of rock strength certificates.

References

1. Karev V. I., Kovalenko Yu., Ustinov K. *Geomechanics of Oil and Gas Wells*. Switzerland : Springer International Publishing Cham. *Advances in Oil and Gas Exploration and Production*. 2020. 166 p.
2. Bishop A. U. *Determination of soil properties in triaxial tests [Opredelenie svoystv gruntov v trekhosnyh ispytaniyah]*. M. : Gosstrojizdat. 1961. 232 p.
3. Boldurev G. G., Sidorchuk V. F. *Determination of mechanical properties of soils in a compression device with lateral stress measurement. [Opredelenie mekhanicheskikh svoystv gruntov v kompressionnom pribore s izmereniem bokovykh napryazhenij]*. *Avtomatizirovannye tekhnologii izyskanij i proektirovanie*. 2003. No. 9. Pp. 69–71. (rus)
4. Lee H., Haimson B. *True triaxial strength, deformability, and brittle failure of granodiorite from the San Andreas Fault Observatory at Depth*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2011. Vol. 48. Iss. 7. Pp. 1199–1207. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.08.003
5. Tarasov B., Potvin Y. *Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 2013. Vol. 59. Pp. 57–69. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.011
6. Kwaśniewski M., Li X., Takahashi M. (editors). *True Triaxial Testing of Rocks*. London : CRC Press. *Geomechanics Research Series 4*. 2012. 384 p.
7. Panteleev I. A. [et al.]. *Orientation nature of the deformation memory effect at three-axis cyclic uneven sandstone compression [Orientacionnaya priroda effekta deformacionnoj pamyati pri trekhosnom ciklicheskom neravnokomponentnom szhatii peschanika]*. *Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2022. Vol. 26. No. 2. Pp. 293–310. EDN MMKNTJ. DOI: 10.14498/vsgtu1890 (rus)
8. Bridzhmen P. U. *High-pressure physics [Fizika vysokih davlenij]*. M. — L. : ONTI. 1935. 402 p. (rus)
9. Litvinsky G. G. *Pinch-effect during rock fracture with wedge mining tools [Pinch-effekt pri razrushenii porody klinovym gornym instrumentom]*. *Scientific works collection of DonSTU*. 2018. Iss. 9 (52). Pp. 5–20. EDN XYEIQP (rus)

10. Filimonov Y. L., Lavrov A. V., Shafarenko Y. M., Shkuratnik V. L. Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurements in a rock mass. *Rock Mech. and Rock Enging.* 2001. Vol. 34. Iss. 4. Pp. 275–291.

11. Lavrov A. Kaiser effect observation in brittle rock cyclically loaded with different loading rates. *Mech. Mater.* 2001. Vol. 33. Pp. 669–677. EDN KDMDQN. DOI: 10.1016/S0167-6636(01)00081-3

12. GOST 12248.3. Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing. M. : Standartinform. 2020. 27 p.

13. Litvinsky G. G. Analytical theory of rock and massif strength [Analiticheskaya teoriya prochnosti gornyh porod i massivov]. Donetsk : Nord-Press. 2008. 207 p. (rus)

14. Lavrov A. V., Shkuratnik V. L., Filimonov Yu. L. Acoustoemission memory effect in rocks [Akustoemissionnyj effekt pamyati v gornyh porodah]. M. : MGGU. 2024. 437 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Litvinsky Garry Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,
e-mail: ligag@ya.ru