

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 624.131

ПРИБОР ПРОСТОГО СДВИГА

В. П. Косых¹, А. Ф. Ревуженко²

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: ¹v-kosykh@yandex.ru, ²revuzhenko@yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Разработан прибор для изучения напряженно-деформированного состояния сыпучих сред и грунтов при сдвиге. Прибор позволяет проводить исследование поведения напряжений и дилатансии сыпучих материалов при многократных циклических сдвигах (десятки тысяч). Созданы датчики для длительных измерений дилатансии и напряжений, возникающих в сыпучих средах при лабораторном моделировании геомеханических процессов.

Прибор простого сдвига, однородная деформация, циклическое нагружение, дилатансия, датчики напряжений

DOI: 10.15372/FTPRPI20210417

В настоящее время для исследования сдвиговой деформации геоматериалов — сыпучих сред, грунтов, дробленых горных пород — используют ряд приборов: прямого среза, кольцевого среза, трехосного сжатия и перекашивания и др. [1 – 5]. Каждый из перечисленных приборов имеет свою область применения, свои достоинства и недостатки. Если речь идет об инженерных схемах расчета, когда требуются данные только о некоторых постоянных материала, например об угле внутреннего трения, сцеплении или упругих постоянных, то можно использовать стандартные приборы и методики. Если же эксперименты ставятся с целью построения математических моделей деформирования, то требования к приборам резко повышаются. Теоретически идеальный прибор должен быть таким, чтобы соблюдались следующие требования:

- результаты экспериментов непосредственно использовались при построении математических моделей геосреды;
- из экспериментов определялись все параметры материала и диаграммы деформирования, необходимые для верификации математических моделей.

Отсюда следует одно вполне конкретное условие, которому должен удовлетворять процесс нагружения. Данное условие связано с тем обстоятельством, что большинство математических моделей горных пород и сыпучих материалов строятся в рамках концепции сплошной среды. Следовательно, определяющие уравнения модели описывают поведение бесконечно малого элементарного объема среды. Что это означает? В действительности за требованием бесконечной малости стоит только одно условие: напряжения и деформации в пределах элементарного объема меняться не должны (эксперименты для построения моделей градиентного типа — предмет отдельной работы).

Как известно, любую деформацию можно разложить на две составляющие: изменение объема и сдвиг. Реализация сдвига может осуществляться по неограниченному числу различных программ — траекторий нагружения. В основе их классификации лежит понятие ориентации главных осей тензора деформаций. Если оси неподвижны, то нагружение называется простым. В плоском случае необходимым условием его реализации является преобразование границ деформируемого образца из положения $A_0B_0C_0D_0$ в положение $ABCD$ (рис. 1). Если оси тензора поворачиваются, то границы области должны меняться более сложным образом. Ограничимся случаем простого сдвига.

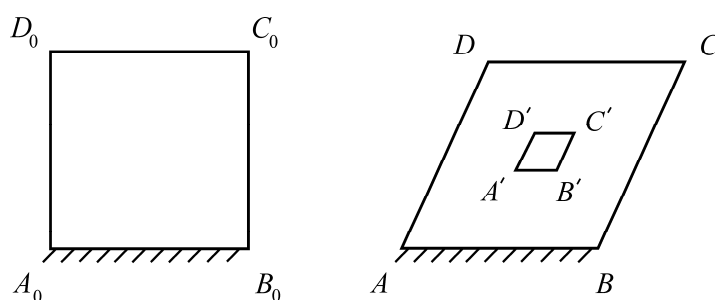


Рис. 1. Простой сдвиг

При условии, что в образце материала конечных размеров удастся реализовать простой сдвиг с однородным распределением деформаций, макрообъем $ABCD$ будет повторять деформации любых микрообъемов $A'B'C'D'$ вплоть до теоретически бесконечно малых. Результаты можно непосредственно использовать для построения дифференциальных уравнений.

В [6] предложен прибор однородного сдвига, в котором неоднородность процесса деформирования была сведена к минимуму. В приборе реализована схема деформирования, показанная на рис. 1, вес направлен ортогонально плоскости $ABCD$. Неоднородность деформирования связана в основном с весом образца: нижние его слои деформировались в условиях пригрузки от вышележащих слоев. Конструкция прибора позволяла сохранять объем камеры и площадь $ABCD$ постоянными при любых, в том числе и больших, сдвигах камеры. Последнее дало возможность исследовать предельные деформации материала, процесс локализации сдвигов по дискретным системам линий скольжения, закономерности дилатансии и упругопластического деформирования. Однако появление новых задач требует создания новых приборов и методик постановки экспериментов. Прибор однородного сдвига достаточно сложен в эксплуатации и не позволяет исследовать поведение материала при большом числе (порядка десятков тысяч) знакопеременных сдвигов.

Рассмотрим модернизацию прибора, которая, с одной стороны, упрощает его конструкцию, а с другой — позволяет реализовать большое число циклов нагружения. По сравнению с прототипом [6] постоянным сохраняется не объем камеры, а длины сторон ромба $ABCD$. При малых сдвигах (до 8°) относительное изменение объема составляет менее 1% и может быть учтено при обработке экспериментальных данных.

При разработке конструкции условие однородности деформаций в образце поставлено на первое место. В теории, конечно, можно не рассматривать влияние веса, но при практической реализации его необходимо учитывать, поэтому буквально реализовать схему однородного деформирования всех сечений объема не представляется возможным. Если рассматривать схему деформирования, когда вес направлен в плоскости рисунка, то вертикальные сечения образца будут неоднородными, т. е. деформация в приборах перекашивания принципиально неоднородна. В предлагаемом приборе так же, как и в прототипе, вес направлен перпендикулярно плоскости (см. рис. 1). Здесь неоднородность проявляется только между различными горизонтальными сечениями образца. В сечениях, находящихся на постоянной высоте, вышележащие слои играют роль постоянной пригрузки. Говоря о дилатансии и напряжениях, можно установить, как они меняются по высоте.

Влияние веса можно смоделировать, давая пригрузку на свободной поверхности. Неоднородность по высоте может быть исследована и учтена при обработке экспериментальных данных. Если же пригрузка значительно больше, чем вес самого образца, то градиентом сжатия по высоте можно пренебречь.

Дно прибора образовано четырьмя пластинами, соединенными между собой в виде ромба с помощью подшипников. На двух противоположных пластинах с помощью шарниров установлены с шагом 10 мм стержни прямоугольного сечения. Ширина стержней составляет 6 мм, поэтому между ними остаются зазоры величиной 4 мм (рис. 2а). Пластины и стержни при сдвиге сближаются. Зазоры между ними уменьшаются (рис. 2б). Поскольку при деформировании dna длины пластин и стержней сохраняются, то такая схема является кинематически допустимой.

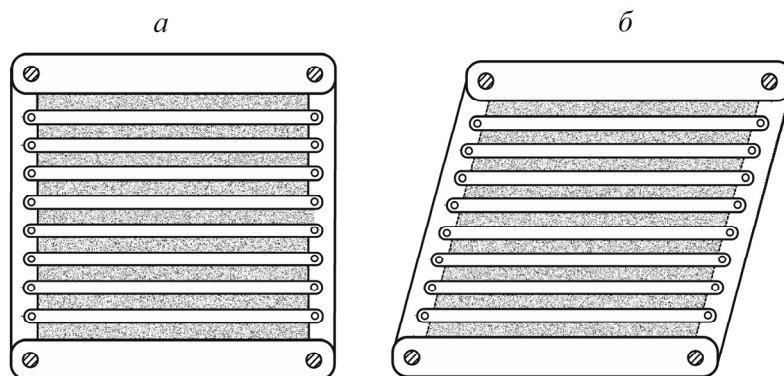


Рис. 2. Конструкция dna прибора

Зазоры между стержнями заполнялись поролоном. Сверху дно покрывалось тонкой резиной (1 мм). Натяжение резины выбиралось таким, чтобы при деформировании гофры не возникали, поэтому неоднородность, связанная с трением материала по дну, сведена к минимуму. Дно выполняло роль одной из активных поверхностей нагружения. В угловых подшипниках dna крепились вертикальные стержни 1–4, которые вместе с нижними и верхними также шарнирно-посаженными пластинами 5, образовывали каркас камеры (рис. 3). Боковые стенки 6 — дюралюминиевые пластины толщиной 3 мм, которые винтами крепились к верхним и нижним пластинам каркаса. Внутренняя поверхность камеры оклеивалась тонкой резиной (1 мм),

что исключало попадание материала в зазоры между боковыми стенками и давало возможность исследования водонасыщенных материалов. В идеальной ситуации на контакте материала и камеры должно быть обеспечено условие прилипания, в реальной — к нему можно приблизиться за счет увеличения коэффициента трения. Резина частично выполняет эту функцию.

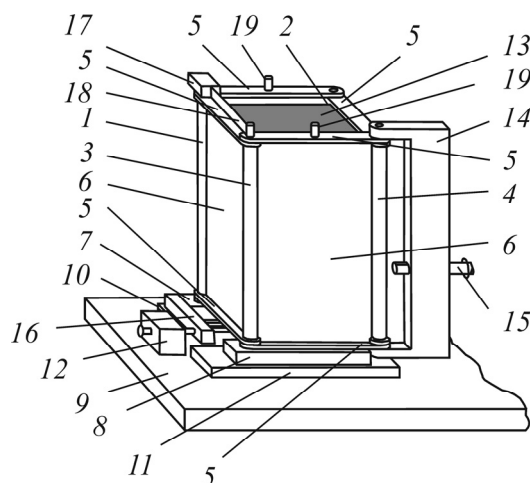


Рис. 3. Схема прибора сдвига. Описание в тексте

Стержни 1, 2 каркаса жестко крепились к опорной плите 7, а стержни 3, 4 — к опорной плите 8. Опорные плиты устанавливались на жесткое основание 9 так, что они могли свободно скользить по нему. Это достигалось за счет того, что контакт плиты 7 с основанием осуществлялся через линейный подшипник 10, а плиты 8 — через прослойку фторопласта 11. Чтобы исключить скольжение задней стенки камеры по основанию, устанавливали упор 12 и симметричный ему, который на рисунке не показан.

В камеру помещался исследуемый материал 13. Сдвиг камеры осуществлялся путем смещения ее передней стенки винтом 15 через скобу 14. Скоба 14 закреплена шарнирно на стойке 4. В процессе нагружения расстояние между передней и задней стенками меняется. Чтобы избежать заклинивания винтовой передачи в скобе 14, платформа, на которой установлен двигатель и подшипники ходового винта (на рис. 3 не показаны), выполнена с возможностью поворота вокруг неподвижной вертикальной оси.

В процессе нагружения фиксировалось общее усилие, которое требуется для сдвига камеры. Для этого на торцах плиты 7 устанавливали два тензодатчика силы 16. Как отмечалось, камера может свободно скользить по плите, поэтому усилия на упорах равны общему усилию сдвига. Для измерения угла сдвига на верхней неподвижной пластине каркаса жестко крепился металлический параллелепипед 17, который служил заделкой консольной балки 18. Другой конец балки опирался на выступающий цилиндрический стержень — продолжение подвижной стойки 3. На балку наклеивались тензорезисторы. При сдвиге камеры балка деформировалась, и на тензорезисторах генерировался сигнал, пропорциональный смещению подвижной стенки.

Для измерения дилатансии и напряжений использовали измерительное устройство, приведенное на рис. 4. Оно состоит из балки 1 с отверстиями по краям и в центре. Через центральное отверстие пропущена металлическая трубка 2 внешним диаметром 3 мм. От продольных перемещений трубка фиксируется на заданной высоте втулками 3, 4 с винтами. К нижней втулке 4 с помощью цилиндрического шарнира 5 присоединен один конец измерительной скобы 6 с наклеенными на нее тензорезисторами (на рис. 4 не показаны). Другой конец скобы с помощью цилиндрического шарнира присоединен ко втулке 7, которая может свободно скользить

по трубке 2. Снизу к втулке 7 прикреплен тонкий дюралюминиевый диск 8 диаметром 50 мм. К нижнему концу трубки присоединен датчик нормальных напряжений 9. Соединительные провода от датчика напряжений пропущены через трубку и далее подключаются к усилителю.

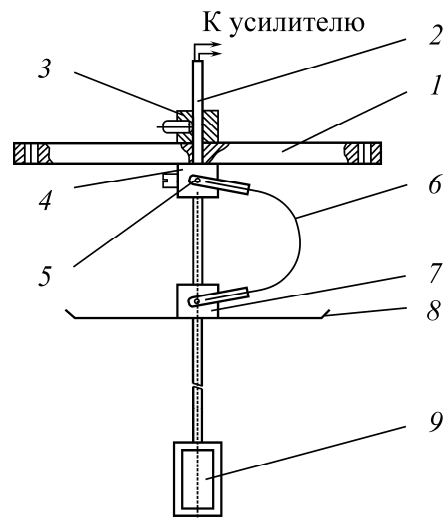


Рис. 4. Устройство для измерения дилатансии и напряжений. Описание в тексте

Во время опыта измерительное устройство закрепляется на двух противоположных пластинах каркаса верхней части камеры путем совмещения крайних отверстий в балке со штифтами (позиция 19 на рис. 3). Затем датчик напряжений устанавливается на требуемой глубине и задается его ориентация. Далее в камеру помещается сыпучий материал и на его свободной поверхности фиксируется диск 8 измерительного устройства. При сдвиге образца меняется его высота и, соответственно, деформации измерительной скобы, поэтому сигнал, поступающий с наклеенных на скобу тензорезисторов, характеризует изменение высоты образца. Для усиления и регистрации сигналов с тензодатчиков использовалась крейтовая система LTR.

Рассмотрим методику измерения напряжений. Несмотря на давность проблемы измерения напряжений, в настоящее время общепризнанного решения ее нет. Суть в том, что геоматериалам характерна множественность форм равновесия, поэтому измерительные датчики должны быть как можно более жесткими. Это требование означает уменьшение деформаций чувствительного элемента датчика и, как следствие, уменьшение генерируемого сигнала. Обработка малых сигналов — процедура достаточно сложная, так как значительно уменьшается отношение «сигнал — шум». В результатах измерений появляются погрешности, которые могут превышать полезный сигнал.

Значение соотношения жесткости датчика и уровня выходного сигнала зависят от его конструкции. На практике для измерения в натуральных условиях получили распространение датчики с гидравлическим преобразованием давления. В этом случае грунт через мембрану создает давление в жидкости, заполняющей некоторый объем датчика. Жидкость, в свою очередь, воздействует на чувствительный элемент (например, более податливую мембрану меньшего диаметра), который генерирует сигнал достаточной величины. Известны и другие конструкции датчиков [7–9]. Однако большие размеры этих датчиков (диаметром 80 мм и более) делают их малоприменимыми при исследовании процессов деформирования сыпучих сред в небольших лабораторных установках.

Например, при длительных статических измерениях существенное значение приобретает стабильность поведения как самих датчиков, так и последующей усилительной аппаратуры. В случае использования тензометрии прежде всего следует отметить изменение сигнала вследствие ползучести самих тензорезисторов и клеевой прослойки, удерживающей их на упругом элементе. При подаче напряжения возбуждения через тензорезисторы протекает электрический ток, который вызывает их нагрев. Выделяемое датчиком тепло рассеивается в окружающих его слоях исследуемой среды, при этом чем больше напряжение возбуждения (а значит, и полезный сигнал), тем больше нагрев датчика. Если в течение длительного времени датчик и среда находятся в состоянии равновесия, то между ними устанавливается температурное равновесие, при этом показания датчика стабилизируются. Если же происходит изменение механического состояния среды, то тепловое равновесие системы “датчик – среда” нарушается. Появляется погрешность генерируемого сигнала, обусловленная изменением температуры датчика и скоростью ее изменения.

Наряду с применением специальных методов термокомпенсации, температурная погрешность измерений, возникающая вследствие нагрева датчиков, может быть уменьшена при снижении напряжения возбуждения. Однако пропорционально напряжению возбуждения уменьшается и выходной сигнал до величин, сопоставимых с погрешностями усилительной аппаратуры. Это временной и температурный дрейф усилителей и их собственные шумы.

Таким образом, датчик для измерения напряжений должен быть жестким и вырабатываемый им сигнал иметь величину, достаточную для последующей обработки. В настоящей работе использована конструкция датчиков напряжений, приведенная на рис. 5 [10].

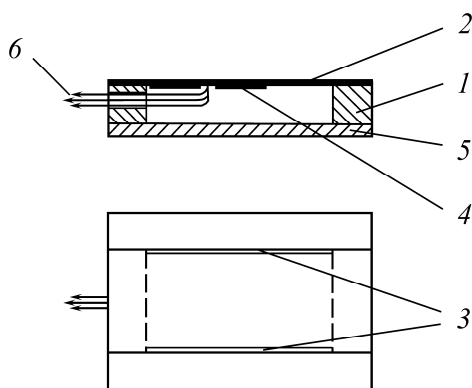


Рис. 5. Датчик для измерения нормальных напряжений. Описание в тексте

К коротким сторонам стального каркаса 1, имеющего форму прямоугольной рамки, припаялась стальная пластина (балка) 2, при этом между ней и длинными сторонами каркаса оставались зазоры 3. С нагружением балка деформируется так, что на ее внутренней стороне вблизи концов возникают деформации сжатия, а в центральной части — деформации растяжения. Для регистрации этих деформаций на пластину 2 наклеивалась розетка 4 типа BF 350-2FG из четырех тензорезисторов, соединенных в мостовую схему. Размеры балки выбирались так, чтобы тензорезисторы розетки деформировались попарно с разными знаками. Такая конструкция чувствительного элемента позволила свести к минимуму влияние ползучести клея, осуществить температурную компенсацию мостовой схемы и обеспечить ее максимальную чувствительность.

Для повышения общей жесткости конструкции к каркасу припаивалась сплошная пластина 5. Соединительные провода 6 выводились через отверстие в торце корпуса. Герметизация датчика осуществлялась тонкой лавсановой оболочкой (на рис. 5 не показана). Максимальный прогиб датчика при давлении 1 КПа не превышает 0.2 мкм, выходной сигнал составляет ~ 4 мкВ/В.

Чтобы снизить влияние теплообмена датчика с исследуемой средой напряжение возбуждения мостовой схемы датчика снижено до 1 В. Мощность, рассеиваемая датчиком, составляла 0.0029 Вт. Если в качестве тензометрического усилителя использовать модуль LTR 212М, входящий в состав крейта LTR, мощность, рассеиваемая датчиком, составит 0.0178 Вт, что в 6.25 раза больше. Опыты показали, что при длительных измерениях малых давлений (1–2 КПа) в сыпучих материалах при напряжении возбуждения датчика 2.5 В сопровождается погрешностью сигнала, достигающей 50–80 %. Уменьшение напряжения возбуждения до 1 В позволяет уменьшить эту погрешность в 4–5 раза. Снижение напряжения питания датчиков потребовало применения тензометрических усилителей с малым дрейфом нуля и низким уровнем собственных шумов. Для этого разработаны оригинальные малошумящие усилители с коэффициентом усиления ~ 1000 . Напряжение на выходе усилителя, например при измерении давления 1 КПа, составляло ~ 4 мВ. После усиления сигнал оцифровывался прецизионным модулем LTR 114.

ВЫВОДЫ

Эксплуатация разработанного прибора и измерительного комплекса показала, что получаемые экспериментальные результаты являются достоверными. Если исследуются одни и те же параметры, но при различных внешних условиях, например, немного меняется температура, влажность или другие параметры, то диаграммы остаются такими же. Требование повторяемости выполняется. Предлагаемый прибор дает высокую степень однородности процесса деформирования образца геоматериала и допускает реализацию десятков тысяч циклов нагружения, достаточно прост и надежен в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12248.1. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. — М.: Стандартиформ, 2020.
2. Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. — М.: Прондо, 2014.
3. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
4. Бугров А. К., Нарбут Р. М., Сипидин В. П. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. — Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. — 184 с.
5. Крыжановский А. Л., Вильгельм Ю. С., Рахманов Т. Определения угла трения сыпучих грунтов в трехосной аппаратуре и сдвиговых приборах // Основания фундаменты и механика грунтов. — 1983. — № 6.
6. Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. — 1974. — № 3. — С. 130–133.

7. **Куликов А. В.** Измерение напряжений в грунтах модернизированными датчиками // Интернет-журнал “Транспортные сооружения”. — 2019. — № 1. — Т. 6.
8. **Баранов Д. С.** Общие и метрологические требования к датчикам давлений (месдозам) и методы испытаний / Тензометрические приборы для исследования строительных конструкций. — М.: Стройиздат, 1971.
9. **Криворотов А. П.** О методике измерений давлений в грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1971. — № 1.
10. **Бобряков А. П., Клишин С. В., Косых В. П., Ревуженко А. Ф.** О проблеме измерения и расчета напряжений при выпуске сыпучих материалов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 4. — № 3. — С. 32–37.

Поступила в редакцию 27/V 2021

После доработки 28/VI 2021

Принята к публикации 30/VI 2021