

УДК 624.131.21 + 539.37

**ПОТЕРЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЕСЧАНОГО ОСНОВАНИЯ
ТЯЖЕЛОЙ КОЛОННЫ И ЗАГЛУБЛЕННОЙ В СЫПУЧУЮ СРЕДУ ПЛАСТИНЫ
ПРИ МНОГОКРАТНЫХ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

В. П. Косых, О. А. Микенина

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

Приведены результаты экспериментов и численных расчетов по исследованию устойчивости тяжелой колонны, установленной на поверхности сыпучей среды, и заглубленной пластины. Колонна и пластина нагружались допредельной статической нагрузкой. На сыпучую среду воздействовали многократными слабыми ударами. В лабораторных экспериментах установлено, что при таких нагружениях сыпучая среда постепенно эволюционирует к критическому состоянию и происходит потеря сдвиговой прочности. Скорость приближения к критическому состоянию растет с увеличением числа ударов. Критическое число ударов до разрушения среды подчиняется логнормальному распределению. Наиболее вероятное значение критического числа ударов экспоненциально увеличивается при уменьшении статической нагрузки. Численное моделирование потери устойчивости заглубленной в сыпучую среду пластины методом дискретных элементов дают качественно совпадающие с экспериментом результаты.

Слабые удары, статические напряжения, сыпучие среды, сдвиговая прочность, разрушение, потеря устойчивости, лабораторный эксперимент, метод дискретных элементов

DOI: 10.15372/FTPRPI20240605

EDN: WYATLE

В настоящее время накоплен обширный материал по натурным наблюдениям [1 – 7] и лабораторным экспериментам [8 – 12], а также разработаны математические модели и даны численные расчеты [11 – 14], показывающие, что внутренняя структура (зерна, блоки, разломы, трещины, наличие флюидов и т. д.) играет существенную роль в формировании неоднородного напряженного состояния геосреды и наличия зон с внутренними самоуравновешенными напряжениями высокой концентрации. Встречаются случаи, когда незначительное внешнее воздействие может сыграть роль триггера и привести к катастрофическим динамическим проявлениям горного давления (стреляние, толчки, горные удары, внезапные выбросы и др.). С состоянием внутренней структуры связаны и процессы деградации сред, потери ими прочности и несущей способности.

Работа выполнена в рамках проекта НИР (№ гос. регистрации 121052500138-4).

В настоящей работе исследовалась устойчивость тяжелой колонны, установленной на песчаном основании, и погруженной в песок пластины, которые нагружались допредельным опрокидывающим моментом и многократными упругопластическими импульсами, распространяющимися по массиву песка.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на стенде, показанном на рис. 1а, б. Он представляет собой камеру 1, имеющую форму параллелепипеда размерами 500×150×250 мм. Стенки и дно камеры выполнены из древесно-стружечной плиты, толщиной 16 мм. С внутренней стороны к передней стенке прикреплена упругая дюралюминиевая пластина толщиной 1 мм, которая соединена с металлическим стержнем 3, проходящим через отверстие в стенке и направляющую втулку 2. Задняя и боковые стенки камеры оклеены листовым поролоном, покрытым алюминиевой фольгой. Толщина поролона составляет 3 мм. Рядом с передней стенкой смонтировано устройство, позволяющее наносить удары по металлическому стержню. Устройство выполнено в виде физического маятника и электродвигателя 4 с эксцентрик. Вращающийся эксцентрик отклоняет маятник 5 на заданный угол, маятник срывается с эксцентрика и ударяет по стержню. В результате на стержень действует импульс силы, который деформирует упругую пластину и передается от нее сыпучему материалу 6, заполняющему камеру. Этот импульс пробегает по образцу сыпучего от передней стенки к задней, вызывая его упругопластическое деформирование. Для измерения параметров импульса в сыпучем материале помещались 4 вибропреобразователя 11 массой 0.14 г, диаметром 3 и высотой 3.6 мм (рис. 1в). Датчики крепились в пластинках 12 из бронзовой фольги толщиной 0.2 мм, шириной 20 и высотой 10 мм и с помощью подвесов 13 из тонкой упругой проволоки и перекладин 14 размещались в сыпучем материале на глубине 125 мм. Расстояние от передней стенки до первого датчика составляло 70 мм, между первым, вторым и третьим датчиками — 80 мм, между третьим и четвертым — 200 мм.

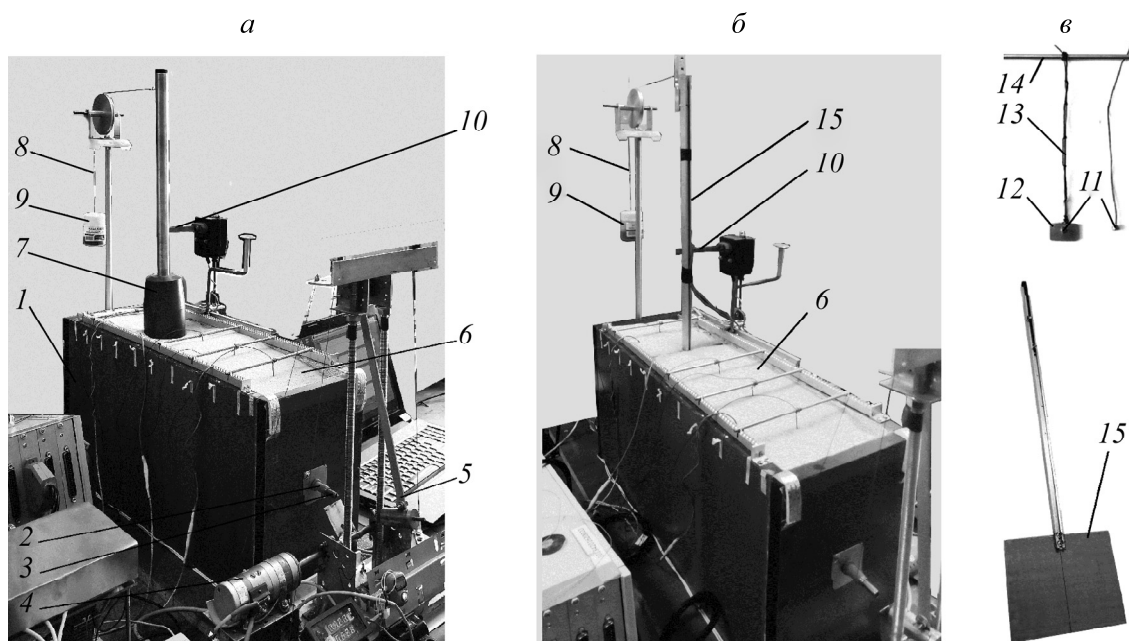


Рис. 1. Стенд для исследования устойчивости тяжелой колонны (а) и заглубленной в сыпучую среду пластины (б), а также вибропреобразователь ICP AP2019 (в)

В первой группе экспериментов исследовалась устойчивость колонны. Для этого в камеру засыпали песок и выравнивали его поверхность по горизонтали. На поверхность образца вертикально устанавливалась модель колонны 7 массой 3 кг. Опорная поверхность ее основания представляла собой круг диаметром 65 мм. Центр основания колонны находился на расстоянии 350 мм от передней стенки на продольной оси симметрии камеры (рис. 1а).

Во второй группе экспериментов изучалась устойчивость пластины, погруженной в песок. Для этого в песок при засыпке помещали плоскую дюралюминиевую пластину 15 шириной 133 мм, высотой 110 мм. Глубина погружения пластины в песок составляла 100 мм, расстояние от передней стенки камеры до пластины — 350 мм. Масса пластины с рычагом — 160 г.

Сначала проводили эксперименты по определению предельных моментов, вызывающих опрокидывание колонны и пластины при статическом нагружении. Камера через воронку заполнялась кварцевым песком. На его поверхности размещалась колонна, либо при засыпке в образец погружалась пластина. Вертикальность установки колонны и пластины проверяли отвесом. С помощью нити 8, перекинутой через блок, и груза 9 колонна или пластина нагружались горизонтальной силой. Вес груза при проведении опыта увеличивался до опрокидывания колонны или пластины. С помощью тензометрического датчика 10, установленного на высоте 150 мм от поверхности песка, измерялся угол отклонения (наклона) колонны или пластины от вертикали в зависимости от горизонтальной силы. Опыты повторялись по 15 раз, среднее значение силы принималось за предельное. По нему рассчитывался предельный опрокидывающий момент, который составил 0.68 Н·м для колонны и 2.91 Н·м для пластины.

В следующей серии экспериментов колонна (либо пластина) нагружалась допредельным моментом, не вызывающим падения колонны, и проводилось воздействие на образец многократными ударами с энергией 0.02 Дж и частотой 1 Гц. С помощью датчика 10 непрерывно записывался угол наклона колонны (пластины) в зависимости от числа ударов. Каждый опыт продолжался до падения колонны (пластины). Для колонны выполнено 4 группы экспериментов, соответствующих четырем значениям опрокидывающего момента: 57, 74, 85 и 97% от предельного. При каждом значении опрокидывающего момента опыты повторяли 100 раз. Для пластины проведено 5 опытов с опрокидывающим моментом 1.58 Н·м, что составляло 54% от предельного.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При размещении колонны в песчаном основании возникают напряжения от ее веса и после некоторого уплотнения песка в системе “основание–колонна” устанавливается статическое равновесие. Такое равновесие может существовать сколь угодно долго, если исключить вязкие деформации основания (ползучесть) и устранить влияние внешних факторов: температуры, вибрации, сотрясений, влажности и др. Если колонна нагружается опрокидывающим моментом, то происходит ее быстрый наклон на некоторый угол, зависящий от величины момента, и вновь устанавливается равновесие.

Импульс от удара распространяется в виде упругопластической волны по образцу материала. Происходит необратимое проскальзывание частиц песка относительно друг друга. Энергия, заключенная в импульсе, рассеивается на контактах. Это сказывается на амплитуде и форме импульса. На рис. 2а, б приведены осциллограммы импульса ускорений, зафиксированные первым и третьим датчиками соответственно. Видно, что размах импульса при прохождении в песке расстояния 160 мм уменьшился в 11 раз.

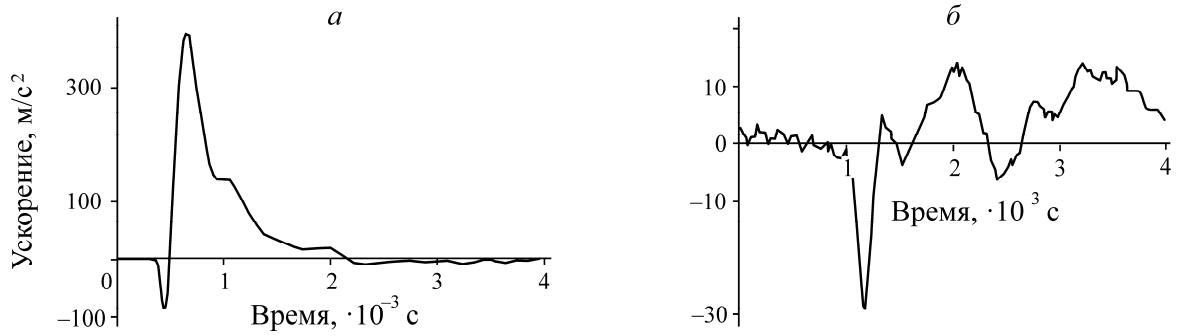


Рис. 2. Осциллограммы упругопластического импульса, зафиксированные первым (а) и третьим датчиками (б)

По мере роста числа ударов проскальзывания накапливаются, изменяется взаимное положение частиц, число контактов между ними и плотность материала образца. В материале перестраиваются силовые цепочки и меняется распределение локальных напряжений. Возникают области, в которых проскальзывания локализуются вблизи некоторой поверхности. Сопротивление материала сдвигу в таких областях уменьшается настолько, что под действием опрокидывающего момента происходит срез материала и падение колонны. Внешне эти процессы проявляются в виде постепенного проседания свободной поверхности образца со стороны передней стенки и увеличения наклона колонны. Типичное изменение угла наклона колонны в зависимости от числа ударов показано на рис. 3а. Оно хорошо аппроксимируется функцией

$$\alpha = A + B \ln(C - N), \tag{1}$$

где $A > 0$; $B < 0$; $C \geq N^* + 1$; N^* — критическое число ударов, при котором происходит падение колонны.

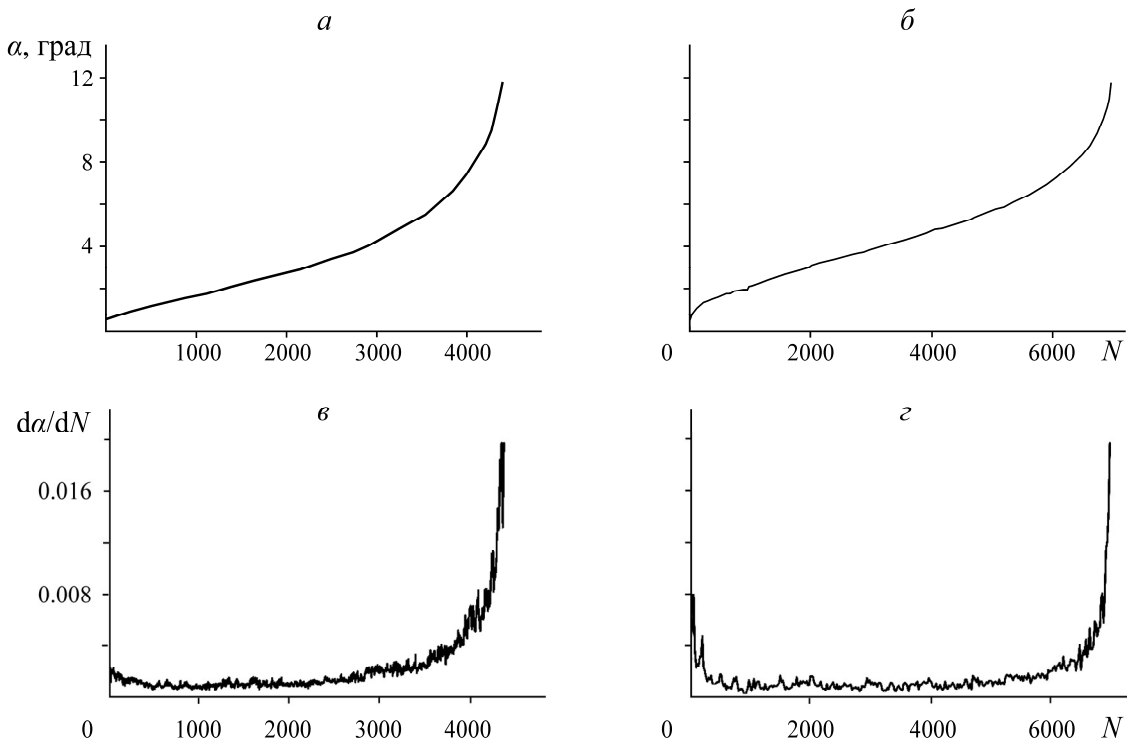


Рис. 3. Зависимость угла наклона и скорости его изменения от числа ударов для колонны (а, в) и заглубленной пластины (б, з)

На рис. 3в представлен график скорости изменения угла наклона колонны, полученный численным дифференцированием угла наклона. Видно, что сначала она постепенно уменьшается с 0.002 до 0.001 град/удар, а затем все быстрее возрастает. После достижения некоторого предельного угла наклона наступает стадия разрушения основания, которая характеризуется лавинообразным ростом скорости изменения угла наклона и падением колонны.

Аналогичные результаты получены и в экспериментах с пластиной. На рис. 3б приведена зависимость угла наклона пластины, а на рис. 3г зависимость скорости изменения угла наклона пластины от числа ударов. При сопоставлении этих рисунков с рис. 3а, в обнаруживается подобие процессов, происходящих в сыпучем материале при потере устойчивости колонны и пластины под действием статической нагрузки и слабых ударов. Отсюда следует, что угол наклона содержит в себе информацию о накопленных проскальзываниях.

Приведем зависимость скорости изменения угла наклона колонны, нагруженной постоянным опрокидывающим моментом, равным 74% предельного (M_{max}) от накопленного угла наклона (рис. 4а). Здесь по оси ординат отложена скорость в логарифмическом масштабе, а по оси абсцисс угол наклона. Приведем также диаграмму статического нагружения колонны, полученную в первой серии опытов при определении предельного момента (рис. 4б), где по оси ординат отложен опрокидывающий момент, отнесенный к предельному. Точка а на рис. 4б соответствует моменту $0.74 M_{max}$.

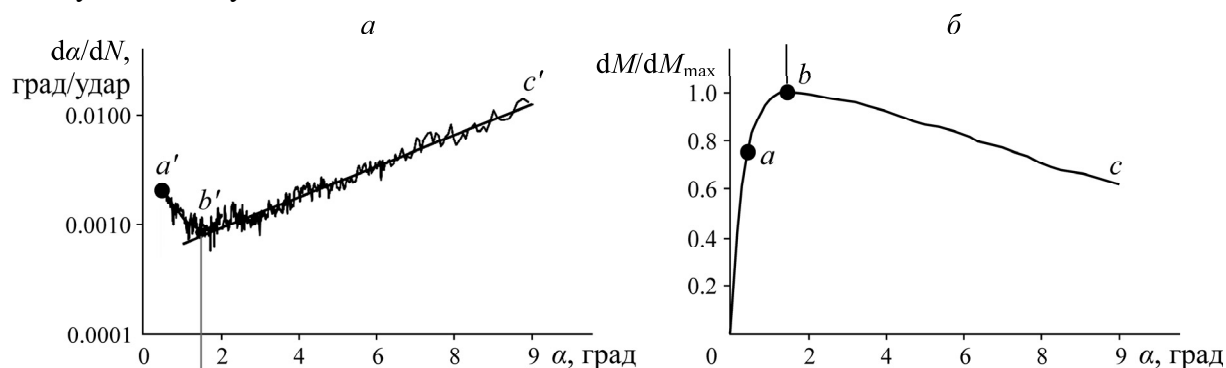


Рис. 4. Зависимости скорости изменения угла наклона от угла наклона при ударном воздействии (а) и изменения опрокидывающего момента от угла наклона колонны при статическом нагружении (б)

Сопоставление этих диаграмм показывает, что в диапазоне углов, соответствующем возрастанию опрокидывающего момента до предельного значения (участок ab), скорость изменения угла наклона колонны при слабых ударных воздействиях уменьшается (участок $a'b'$). При значении угла наклона, соответствующего максимальному моменту (точка b), скорость проходит через минимум (точка b') и в дальнейшем происходит ее рост. Зависимость скорости изменения угла наклона колонны от угла наклона на участке ее роста хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью (рис. 4а, участок $b'c'$).

Характерная черта проведенных опытов — большой разброс критического числа ударов N^* , т. е. ударов до падения колонны. Это связано с невозможностью точного воспроизведения структуры образца от опыта к опыту. Падение колонны происходит по достижении критического значения ударов N^* , соответствующего критическому значению α^* . Из равенства (1) следует, что N^* является функцией α^* . В сериях опытов, проведенных в одинаковых условиях, обнаружено, что значения α^* подчиняются нормальному закону, поэтому соответствующее ему распределение критического числа ударов N^* — логнормальному закону. При логнор-

мальном распределении по нормальному закону распределена не сама величина, а ее логарифм. Логнормальное распределение возникает в результате умножения большого числа независимых случайных величин. В основе этого распределения лежит процесс, в котором действие каждого добавочного фактора на случайную величину пропорционально значению самой величины. Логарифмически нормальное распределение применяют, например, для описания поврежденности деталей машин [15].

Рассмотрим результаты экспериментов, в которых определялось распределение значений N^* в зависимости от приложенного постоянного опрокидывающего момента. Опыты при заданных опрокидывающих моментах повторяли 100 раз. В каждом опыте определяли критическое число ударов. По совокупности опытов построены гистограммы распределения критического числа ударов для четырех значений опрокидывающего момента, которые показаны на рис. 5.

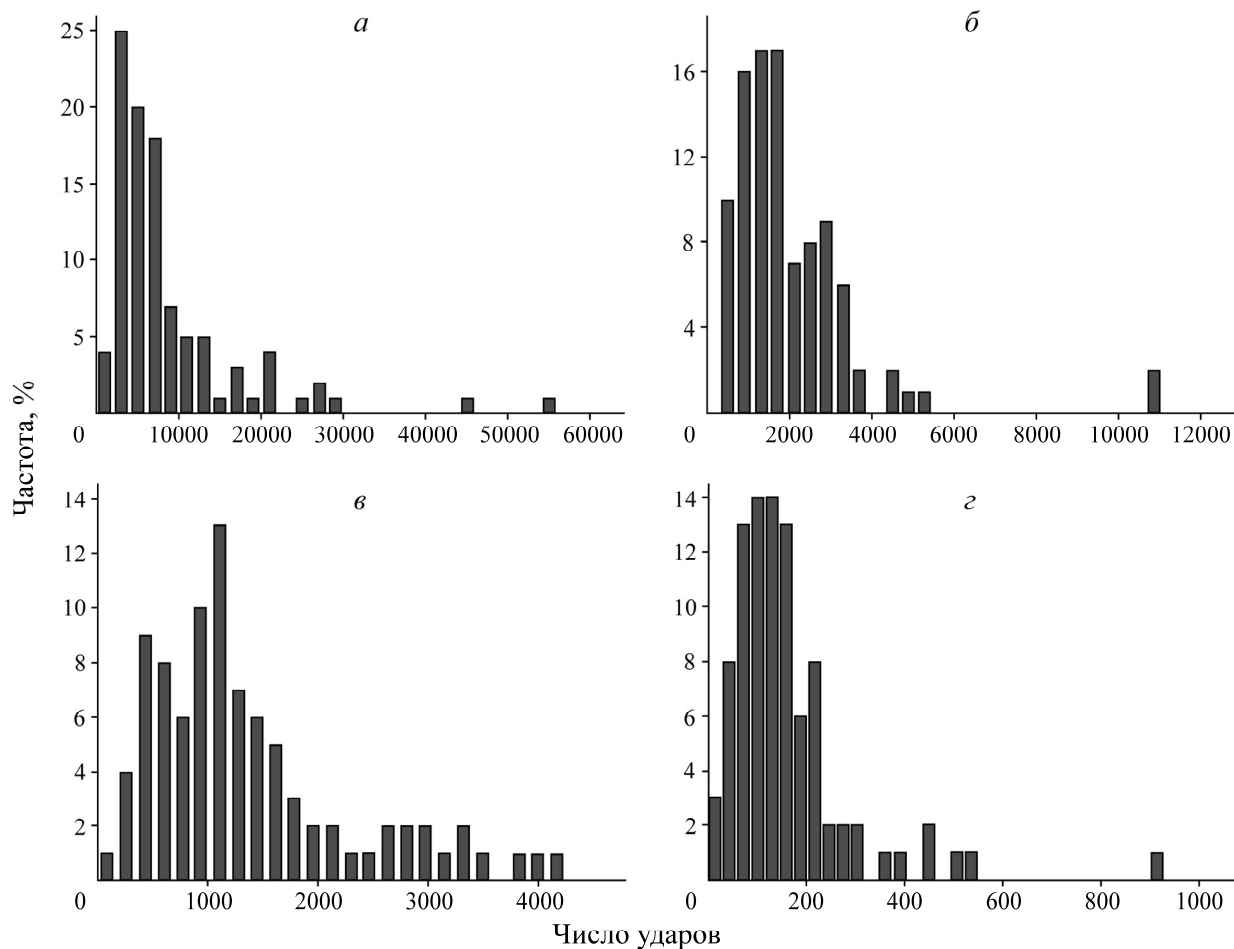


Рис. 5. Распределение критического числа ударов N^* для четырех значений опрокидывающего момента M/M_{\max} : а — 0.57; б — 0.74; в — 0.85; г — 0.97

Проверка соответствия полученных совокупностей критического числа ударов логнормальному распределению проводилась с помощью критерия Шапиро–Уилка. Значение этого критерия составило 0.96–0.98 для представленных диаграмм.

Установлено, что наиболее вероятное число ударов (медиана), соответствующее максимуму распределения, зависит от опрокидывающего момента при неизменных других параметрах опыта. Эта зависимость показана на рис. 6. Точками отмечены экспериментальные значения, линией — аппроксимация экспонентой.

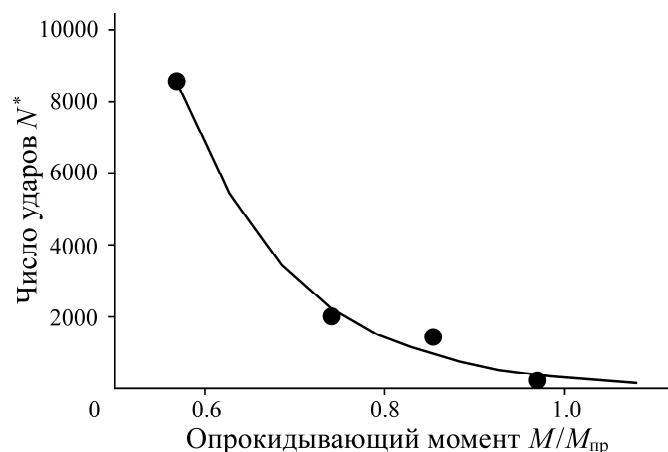


Рис. 6. Зависимость наиболее вероятного критического числа ударов от значения опрокидывающего момента

Большой разброс критического числа ударов получен также в опытах с пластиной. Например, в пяти опытах с моментом, составляющим 54 % от предельного, критическое число ударов изменялось от 168 до 11000.

Проведенные эксперименты показывают, что сыпучая среда, нагруженная постоянной допредельной нагрузкой, под действием длительных слабых ударов постепенно теряет сопротивление сдвигу. Число ударов до потери сдвиговой прочности при равных условиях подчиняется логнормальному распределению. Наиболее вероятное критическое число ударов (медиана распределения) возрастает при уменьшении величины действующих статических напряжений.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование влияния многократных циклических воздействий на потерю несущей способности сыпучей среды проводили методом дискретных элементов. Расчеты выполнены с использованием ПО Altair EDEM (академическая лицензия). Модуль Юнга E материала частиц и стенок полагали равным 10^{10} Па, коэффициент Пуассона — 0.25, плотность частиц — 2500 кг/м^3 . Коэффициент трения между частицами, а также между частицами и стенками равнялся 0.4. Коэффициент восстановления скорости составлял 0.7. Расчеты велись с учетом веса частиц.

Для расчетов формировался образец из 22 000 дискретных элементов. Для этого кубическая емкость с ребром 2 м случайным образом заполнялась сферическими частицами радиуса 1.6 см. Боковые (вертикальные) стенки емкости равномерно сдвигались навстречу друг другу. Движение стенок прекращалось, когда длина и ширина образца становились равными 1 м, при этом высота образца устанавливалась равной 1.3 м. Далее в образец вертикально помещалась жесткая пластина прямоугольной формы (рис. 7).

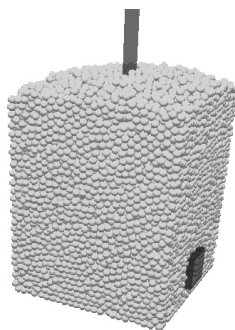


Рис. 7. Модель образца из дискретных элементов

Ширина пластины составляла 0.2 м, высота — 0.8 м, глубина погружения в частицы — 0.4 м. Коэффициент трения между частицами и пластиной равнялся 0.4. Пластина нагружалась опрокидывающим моментом, который не изменялся. Расчеты проводились со значениями момента 10, 30, 40 и 120 Н·м.

Циклическое нагружение несущего материала осуществлялось возвратно-поступательным вдавливанием в материал стержня квадратного сечения размером 0.2×0.2 м на глубину 0.2 м (рис. 7). Скорость движения стержня равнялась 0.1 м/с. Полученные в расчетах зависимости угла наклона пластины от числа циклов нагружения приведены на рис. 8. Числа на диаграмме соответствуют опрокидывающим моментам.

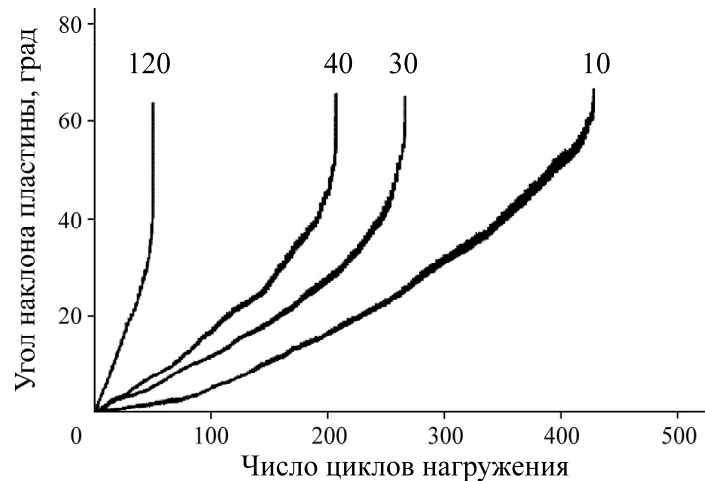


Рис. 8. Расчетные зависимости угла наклона пластины от числа циклов нагружения

Результаты расчета показывают, что с увеличением числа циклов нагружения происходит увеличение угла наклона пластины. По достижении некоторого критического значения угла наклона происходит резкое, неконтролируемое падение пластины. Критический угол уменьшается с увеличением опрокидывающего момента. Так, при 10 Н·м он составляет 62° , а при 120 Н·м — 36° . Критическое число циклов нагружения, т. е. число циклов, при котором происходит падение пластины, также зависит от опрокидывающего момента: при 120 Н·м — 50, при 10 Н·м достигает 420. Полученные зависимости качественно согласуются с результатами экспериментов.

ВЫВОДЫ

Тяжелая колонна, установленная на поверхности сыпучей среды, и заглубленная в песок пластина, нагруженные до предельного опрокидывающего момента под действием многократных внешних импульсов, распространяющихся в среде, постепенно теряют устойчивость. Угол наклона колонны и заглубленной пластины, нагруженных статическим опрокидывающим моментом, увеличивается с возрастающей скоростью при росте числа распространяющихся в среде внешних импульсов.

Критическое число внешних импульсов, соответствующее переходу сыпучей среды в предельное состояние, увеличивается при уменьшении статической нагрузки и подчиняется лог-нормальному распределению.

Численное моделирование процессов потери устойчивости заглубленной в сыпучий материал пластины при циклических внешних нагружениях дает результаты, качественно согласующиеся с физическим экспериментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. / Отв. ред. академик Н. Н. Мельников. — Новосибирск: СО РАН, 2012. — 631 с.
2. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. — М: Наука, 2003. — 270 с.
3. Пономарев В. С. Проблемы изучения энергетически активной геологической среды // Геотектоника. — 2011. — № 2. — С. 66–75.
4. Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. — М.: Геос, 2016. — 424 с.
5. Горяинов П. М., Давиденко И. В. Тектоно-кессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений — важное явление геодинамики // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 5. — С. 1212–1215.
6. Peng Z. and Gomberg J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena, Nature Geoscience, 2010, Vol. 3. — P. 599–607.
7. Brune J. N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophysical Research., 1970. — Vol. 75. — Issue 26. — P. 4997–5009.
8. Ставрогин А. Н., Ширкес О. А. Явление последействия в горных породах, вызванное предшествующей необратимой деформацией // ФТПРПИ. — 1986. — № 4. — С. 16–27.
9. Адушкин В. В., Гарнов В. В., Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф. Знакопеременная реакция горной породы на динамическое воздействие // Докл. АН. — 1992. — Т. 323. — № 2. — С. 263–269.
10. Адушкин В. В., Кочарян Г. Г., Остапчук А. А. О параметрах, определяющих долю энергии, излучаемой при динамической разгрузке участка массива горных пород // ДАН. — 2016. — Т. 467. — № 1. — С. 86–90.
11. Бобряков А. П., Косых В. П., Ревуженко А. Ф. О катастрофических последствиях длительных слабых воздействий на сыпучую среду // ФТПРПИ. — 1995. — № 1. — С. 19–24.
12. Бобряков А. П., Косых В. П., Ревуженко А. Ф. О влиянии длительных слабых воздействий на сопротивление сыпучих сред срезу // ФТПРПИ. — 1996. — № 2. — С. 26–30.
13. Лавриков С. В., Ревуженко А. Ф. О деформировании блочной среды вокруг выработки // ФТПРПИ. — 1990. — № 6. — С. 7–15.
14. Журкина Д. С., Клишин С. В., Лавриков С. В., Леонов М. Г. Моделирование локализации сдвигов и перехода геосреды к неустойчивым режимам деформирования на основе метода дискретных элементов // ФТПРПИ. — 2022. — № 3. — С. 13–22.
15. Журкина Д. С., Лавриков С. В., Ревуженко А. Ф. Об одной модели совместного деформирования проппанта и породного массива при гидроразрыве пласта // ФТПРПИ. — 2023. — № 5. — С. 12–23.
16. Лавриков С. В. О расчете напряженно-деформированного состояния разупрочняющегося блочного массива вблизи выработки // Физическая мезомеханика. — 2010. — Т. 13. — № 4. — С. 53–63.
17. Краснов Ю. В., Никандров И. С., Шурашов А. Д. Логарифмический закон суммирования усталостных повреждений при нестационарных режимах // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6.

Поступила в редакцию 18/X 2024

После доработки 31/X 2024

Принята к публикации 08/XI 2024