

УДК 624.131+69.059.22

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СЫПУЧЕЙ СРЕДЕ

**А. П. Бобряков**

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

С применением физического моделирования исследуется устойчивость сооружения (платформы) на свайном основании. В качестве возмущающей силы используется маятник, создающий сейсмоимпульсные колебания. В процессе проведения лабораторных экспериментов измерялись смещения двух точек на поверхности платформы, с помощью которых определялся ее наклон, варьировались количество ударов, энергия удара, расстояние до источника колебаний, вес платформы.

*Сыпучая среда, несущая способность, трение, триггерное воздействие, амплитуда, затухание, ударная волна, сила сопротивления, смещения*

Известно, что вблизи источников вибраций, вызванных железнодорожным транспортом, метрополитеном, автомобильным транспортом и т. п., наблюдаются длительные процессы, вызванные накоплением вертикальных смещений близлежащих объектов.

Динамические смещения связаны с нарушением прочности грунта под воздействием волн от кратковременных импульсных нагрузок. Ослабление сопротивления грунта по контактирующим поверхностям элементов конструкций возникают с началом действия отрицательной волны разгрузки, вызывающей уменьшение их бокового обжатия нормальным давлением [1–3].

Смещение за один цикл может быть незначительным, но при повторных нагрузках эффект будет накапливаться. Это может происходить десятилетиями, а количество приложений нагрузок за срок службы, например автомобильных дорог первой категории, как источника возмущений, будет исчисляться несколькими миллионами [4].

Вопросы циклического нагружения деформирования сред до их разрушения рассматривались во многих работах, например в [5–8]. Здесь число циклов до разрушения оценивалось как отношение предельной или запредельной деформации к ширине петли гистерезиса, образованной циклом “нагрузка – разгрузка”.

В данной работе рассматриваются следующие вопросы — какое число циклов следует приложить к объекту, чтобы произошел его значительный наклон в сторону точки приложения возмущающей динамической нагрузки и как число циклов зависит от энергии единичного удара, от расстояния до точки приложения нагрузки. Для этого через несущую способность группы стержней, внедренных в массив под совместным воздействием статической пригрузки и циклических возмущений, исследовалась устойчивость объекта, размещенного на разных площадках грунта.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В опытах для хорошей воспроизводимости результатов особое внимание уделено созданию начальной однородной структуры сыпучей среды, поскольку одна и та же сыпучая среда может иметь множество состояний по характеру упаковки частиц. Получение образцов с одинаковыми от опыта к опыту механическими свойствами достигалось предварительными знакопеременными циклическими сдвигами материала на малой амплитуде, которые эффективно устраняют дефекты упаковки, уплотняют среду, не вызывая в ней локализацию деформаций. Подробное описание методики и устройства деформирования приведено в [9, 10].

Стабилизационное деформирование материала ограничивалось 30 циклами при размахе угла сдвига  $\pm 1.5^\circ$ . В результате сыпучая среда уплотнялась и возникало некоторое однородно-анизотропное, близкое к стационарному, состояние.

На рис. 1 показана экспериментальная установка устройства и ударного узла. Устройство включает платформу и 17 укрепленных на ней гладких заостренных на конце металлических стержней диаметром 2.5 и длиной 42 мм, расположенных равномерно в шахматном порядке. Длина исследуемой площадки грунта в направлении распространения продольной волны (в направлении удара) равна 100 мм, на ней размещены семь рядов стержней.

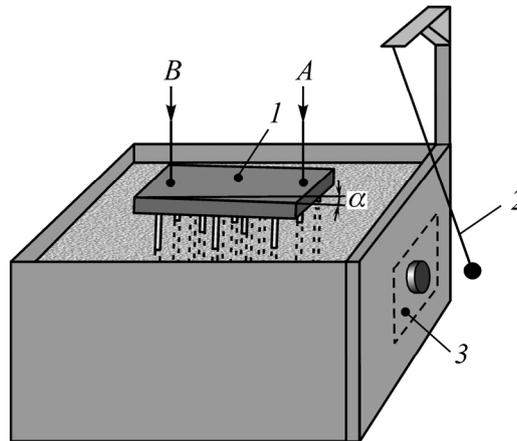


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — платформа со стержнями; 2 — физический маятник; 3 — виброплатформа

Установка платформы осуществлялась равномерным вертикальным вдавливанием ее в грунт до упора с предварительно закрепленными съемными ограничителями так, чтобы расстояние платформы над поверхностью песка в исходном состоянии всегда было постоянным, строго горизонтальным и составляло 12 мм, а длина заглубленной части стержней — 30 мм.

Таким образом, предварительное стабилизационное деформирование материала и одинаковая глубина установочного внедрения обеспечили постоянство исходной предельной касательной нагрузки по боковым поверхностям стержней, среднее значение которой при небольшом разбросе данных от опыта к опыту составляло  $\tau_n \approx 1.75$  кПа. В экспериментах использовалось 9 значений равномерно распределенной пригрузки, которая совместно с весом модели вызывала на боковых поверхностях стержней касательные напряжения  $\tau$ , составляющие отношение от предельного значения  $\tau_n$ , равное  $\tau/\tau_n \approx 31.4 \div 86\%$ .

В качестве “триггерного” устройства использован сейсмоисточник в виде физического маятника, выполненного из жесткого легкого стержня 2, на конце которого закреплен стальной шар диаметром 18 мм. Длина маятника 300 мм, масса шара 35 г. Продольная волна сжатия

создавалась “точечным” калиброванным по энергии ударом по виброплатформе 3, стационарно установленной на неподвижной стенке камеры и погруженной в сыпучий материал. Амплитуда волны варьировалась энергией удара при угле отклонения маятника от положения равновесия и имела следующие значения  $E$ , Дж·10<sup>-3</sup>: 0.175, 0.35, 1.40, 2.45, 3.50, 4.55.

В эксперименте в режиме непрерывной записи процесса на двухкоординатном графопостроителе фиксировались вертикальные смещения платформы в двух точках (в направлении  $A$  и  $B$ ), отстоящих друг от друга на расстоянии  $b = 100$  мм; при этом на графике дискретно отмечалось соответствующее число предшествовавших смещениям ударов  $N$ . Смещения в точках измерялись с помощью деформометров из гибких консолей с тензорезисторами, которые одним концом закреплены неподвижно, другим — оперты в точках  $A$  и  $B$ . Изменение смещений приводило к изгибу консолей и деформациям тензорезисторов, усиленный сигнал с которых подавался на входные клеммы графопостроителя.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показаны три возможных варианта смещений платформы: 1 — смещения  $S_A$  и  $S_B$  в точках  $A$  и  $B$  не равны нулю и одинаковы; 2 — смещения в точках неравномерны, возникает наклон; 3 — проседание платформы только в точке  $A$ , также возникает наклон.

В первом варианте смещения равномерны по всей длине платформы. Такого рода смещения связаны с прочностью и смещениями самого грунта и возникают, как правило, при недостаточном его уплотнении. Как показали эксперименты, предварительное стабилизационное уплотнение песка полностью исключает этот вариант.

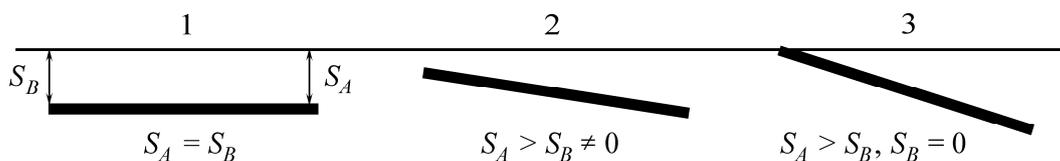


Рис. 2. Схема возможных вариантов смещений платформы

Во втором варианте смещения возникают одновременно в двух точках неравномерно. Неравномерность характеризуется их разностью, по которой определится величина наклона. Такого рода смещения возникают за счет смещения боковой поверхности стержней относительно грунта под воздействием волны разгрузки от сейсмоисточника. Для реализации второго вида смещений необходимо, чтобы в ближней и дальней зонах от источника возмущений каждый раз параметры проходящей волны были достаточными, чтобы вызвать в них эффект запредельного низкого контактного трения в среде и привести платформу в неустойчивое состояние, на краях которой возникают разноамплитудные смещения. В этом случае повторение возмущений вызывает возрастание неравномерности смещений и увеличение наклона.

Третий вариант смещений может быть рассмотрен как частный случай второго, например когда длина платформы в направлении распространения волны достаточно велика. В этом случае из-за сильного ослабления волны в дальней зоне условие  $\tau \geq \tau_n$  становится недостижимым, “триггер” не срабатывает.

Аналогичное условие может быть получено и на платформах с ограниченными размерами путем уменьшения амплитуды “триггера” до уровня ниже предельного значения активации смещений удаленной ее части. Изменяя энергию удара, этот вариант был подтвержден и получен на используемой модели при исследовании условий образования неравномерных смещений, однако в работе главным образом рассматривается второй вариант осадок.

На рис. 3 приведена экспериментальная диаграмма смещения платформы в ближней  $S_A$  и дальней зонах  $S_B$  от источника возмущений. Начало координат соответствует строго горизонтальному положению платформы. Диаграмма получена при постоянно действующем касательном напряжении на боковых поверхностях стержней от пригрузки  $\tau \approx 0.55$  кПа, постоянной энергии триггерного импульсного воздействия  $E = 4.55 \cdot 10^{-3}$  Дж, на расстоянии до ближнего ряда стержней от источника возмущений  $L = 75$  мм. На диаграмме также приведены шкалы, соответствующие количеству ударов  $N$ , предшествовавших смещениям, и расчетным углам наклона платформы  $\alpha$ .

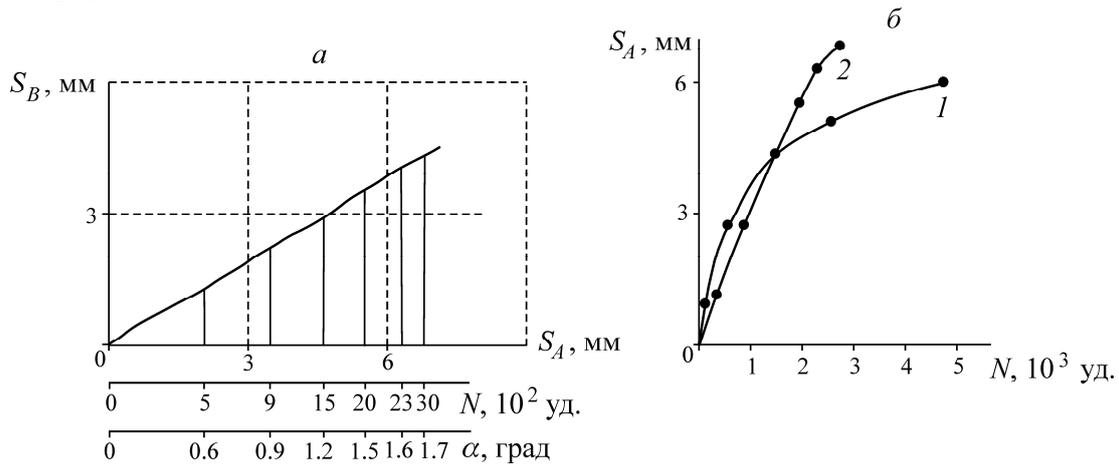


Рис. 3. Смещения под воздействием волны от кратковременной импульсной нагрузки: *a* — двух точек платформы в ближней  $S_A$  и дальней  $S_B$  зонах от источника возмущений при постоянных внешних параметрах; *б* — в ближней зоне  $S_A$  в зависимости от числа ударов  $N$  при разных вариациях внешних параметров: 1 —  $\tau \approx 0.55$  кПа,  $E = 4.55 \cdot 10^{-3}$  Дж; 2 —  $\tau \approx 1.26$  кПа,  $E = 0.175 \cdot 10^{-3}$  Дж

Связь между углом наклона и смещениями определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_A - S_B}{b};$$

для малых углов

$$\alpha_{\text{град}} = \frac{(S_A - S_B) \cdot 1 \text{ рад}}{b}.$$

Под воздействием на сыпучую среду каждого одиночного импульса от сейсмоисточника возникает “скачок” смещений платформы, приводящий ее из одного устойчивого состояния в другое. При этом на диаграмме визуализировалось скачкообразное движение пера самописца от одной точки к другой. Как показывают измерения, волна разгрузки от триггера приводит к длительному (на два порядка большему) времени смещений по сравнению с временем действия возмущающего импульса. Линейная зависимость полученных диаграмм наблюдалась во всех опытах с разными вариациями внешних параметров — энергии одиночного триггерного воздействия  $E$ , напряжений пригрузок  $\tau$ , расстояний ближней зоны платформы до источника возмущений (точка  $A$ ).

На рис. 3*a* процесс накопления смещений носит затухающий характер: каждое повторное возмущение от триггера приводит к возникновению следующего скачка смещения меньшей амплитуды. В качестве примера на рис. 3*б* представлены смещения в ближней зоне платформы  $S_A$  ( $L = 75$  мм) в зависимости от порядкового номера триггерного воздействия  $N$  при измене-

нии внешних параметров. Видно, что как в первом, так и во втором случае смещение с увеличением порядкового номера триггерного воздействия имеет затухающий характер за счет возрастания предельного значения сопротивления внедрению  $\tau_n$  с увеличением глубины. Отметим, что диаграмма на рис. 3а является типичной для всех диаграмм, полученных в опытах. Ввиду разных по величине скачков смещений в ближней и дальней зонах от источника возмущений, диаграммы располагаются под разными углами относительно координатных осей, но всегда  $S_A > S_B$  (второй вариант смещений на рис. 2).

На рис. 4а показаны зависимости угла наклона  $\alpha$  при постоянных значениях расстояний ближнего ряда стержней до источника возмущений  $L = 75$  мм, энергии триггера  $E = 3.5 \cdot 10^{-3}$  Дж, но при разных равномерно распределенных пригрузках. Под действием серий ударов с одинаковыми уровнями энергий процесс имеет затухающий характер. Из экспериментов следует, что на “активизацию” угла наклона существенное влияние оказывает величина пригрузки. Так, сравнивая данные кривых 1 и 5, видно, что наклон, равный углу  $\alpha = 1.6^\circ$  с пригрузкой  $\tau = 0.55$  кПа, составляющей 31.4 % от предельного значения  $\tau_n$ , возникает при 3000 триггерных воздействий, тогда как с пригрузкой  $\tau = 1.51$  кПа, составляющей 86 % от  $\tau_n$ , это значение достигается уже при 150 ударах.

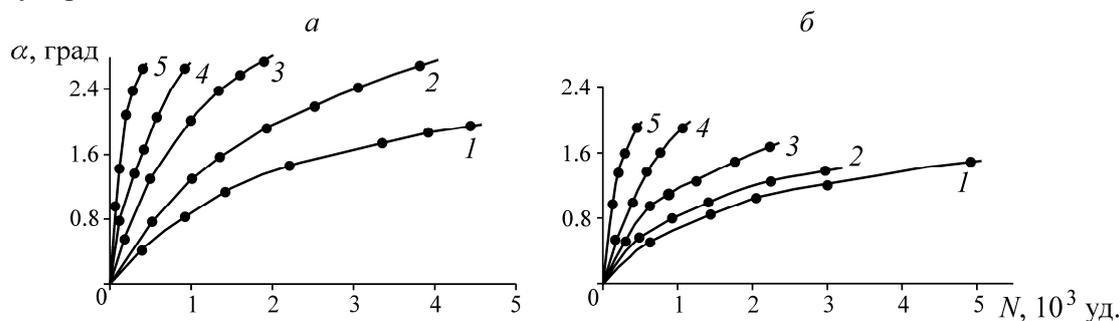


Рис. 4. Наклон платформы  $\alpha$  в зависимости от порядкового номера триггерных воздействий  $N$ : а — при постоянной энергии удара и разных пригрузках  $\tau$ , кПа: 1 — 0.55; 2 — 0.67; 3 — 0.79; 4 — 0.95; 5 — 1.51; б — при постоянной пригрузке и разной энергии удара  $E$ ,  $10^{-3}$  Дж: 1 — 0.175; 2 — 0.35; 3 — 1.4; 4 — 3.5; 5 — 4.55

Далее исследовалось влияние энергии триггерных внешних воздействий на диаграммы смещений платформы. Как уже указывалось, среди различных спусковых механизмов силового воздействия в большинстве случаев решающим фактором является изменение нормального давления  $\sigma$  на контактах, в результате которого отношение  $\tau/\sigma$  может стать больше критического, равного коэффициенту трения среды. Очевидно, что провоцирование по типу изменения сил трения будет зависимым от амплитуды триггеров [2, 3, 11].

На рис. 4б приведены значения углов наклона  $\alpha$  в зависимости от числа триггерных воздействий  $N$  разных энергий. Пригрузка в опытах постоянна ( $\tau = 0.8$  кПа) и составляет 45 % от  $\tau_n$ , расстояние до ближайшего ряда стержней (точки А) от сейсмоисточника также постоянно и равно  $L = 75$  мм.

Представленные зависимости имеют схожую тенденцию изменения угла наклона, как и кривые на рис. 4а, полученные при изменении пригрузки: процесс накопления неравномерных осадок при  $E = \text{const}$  с увеличением числа триггерных воздействий носит затухающий характер; с возрастанием энергии возмущения угол наклона изменяется быстрее. Согласно экспериментальным данным, слабая волна менее эффективна, под ее воздействием отклонение внутреннего трения от статического значения минимально, хотя триггерный эффект при-

существует. Увеличение энергии триггера или пригрузки приводит к одинаковым результатам — возрастанию отношения  $\tau/\sigma$  и некоторой непропорциональной добавке к смещениям в ближней и дальней зонах платформы при каждом инициировании. Полученные разностные значения смещений для расчета углов наклона закономерно возрастают.

Исследования влияния пригрузки и энергии возмущения на величину наклона платформы выполнены при одинаковом ее удалении от источника возмущений. При дистанционном воздействии сейсмической волны от источника до объекта через промежуточную сыпучую среду проходящая волна трансформируется. Здесь наблюдаются процессы затухания, искажения формы и длительности импульса сейсмоисточника. На параметры проходящей волны оказывают влияние прежде всего расстояние от источника до объекта, свойства самого материала, его состояние, особенно пористость.

При рассмотрении механизма возникновения смещений от воздействия волны в эксперименте по методике [12] оценивалась волновая проводимость среды по измеренным амплитудам импульсов ускорений от двух акселерометров: первый установлен стационарно на виброплатформе сейсмоисточника  $a_{\max 1}$  (исходный опорный импульс), а второй — в сыпучей среде на разных дистанциях от нее  $a_{\max 2}$ . Ось чувствительности второго датчика ориентировалась в направлении распространения продольной волны в образце (в направлении удара). Запись импульсов проводилась по двум каналам цифрового осциллографа Agilent 1000 Series, запуск развертки которого осуществлялся от переднего фронта опорного импульса. В зависимости от длины дистанции и отношений получаемых амплитуд сигналов построена кривая затухания волны.

На рис. 5 приведена зависимость максимальных амплитуд источника возмущений и ослабленной волны в сыпучей среде от длины дистанции. Представленные результаты получены на равномерно уплотненном кварцевом песке пористостью 33.6%. На кривой нанесены точки, соответствующие двум положениям платформы относительно источника возмущений:  $A$  — расстояние до ближней зоны, равное 75 мм (дальней зоны  $B$  — 175 мм), и  $A'$  — 40 мм ( $B'$  — 140 мм). Длина поля внедрения стержней в направлении распространения волны составляет 100 мм (см. рис. 1).

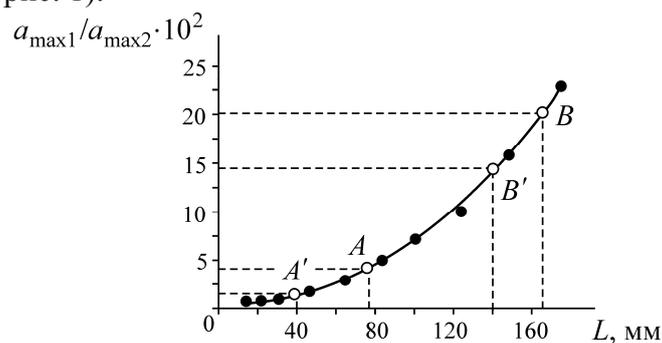


Рис. 5. Затухание волны в зависимости от длины дистанции

Волна на пути от источника возмущений до точки  $A$  претерпевает 375-кратное затухание, в точке  $B$  кратность затухания составляет 2300. Таким образом, волна, пробегая по длине исследуемого поля, при таком расположении платформы ослабевает приблизительно в 6.1 раза.

Рассмотрим ситуацию, когда платформа расположена на более близком расстоянии от источника возмущения, соответствующем точкам  $A'$  и  $B'$ . В этом случае кратность затухания в точках приблизительно равна 150 и 1400, что соответствует ослаблению волны по длине поля примерно в 9.3 раза.

Полученные значения отношений амплитуды волны, действующей на разных концах исследуемого поля, свидетельствуют о том, что с приближением платформы к источнику возмущения степень неравномерности воздействия в ближней и дальней зонах увеличивается более чем в 1.5 раза. Отсюда эффект возникновения наклона объекта в сторону источника возмущений усиливается. Это согласуется с достоверно установленными фактами: смещение и наклон многих зданий возникают в сторону улиц с интенсивным движением городского транспорта; факт усиления неравномерности наблюдается у многих зданий, выстроенных в непосредственной близости от автодорог.

На рис. 6а показаны изменения угла наклона в зависимости от числа импульсных воздействий при разном удалении платформы от источника возмущений (энергия удара  $E = \text{const} = 2.45 \cdot 10^{-3}$  Дж; исходное напряжение на боковых поверхностях стержней от пригрузки  $\tau = \text{const} = 1.02$  кПа составляет 58.3% от предельного значения  $\tau_{\text{п}}$ ).

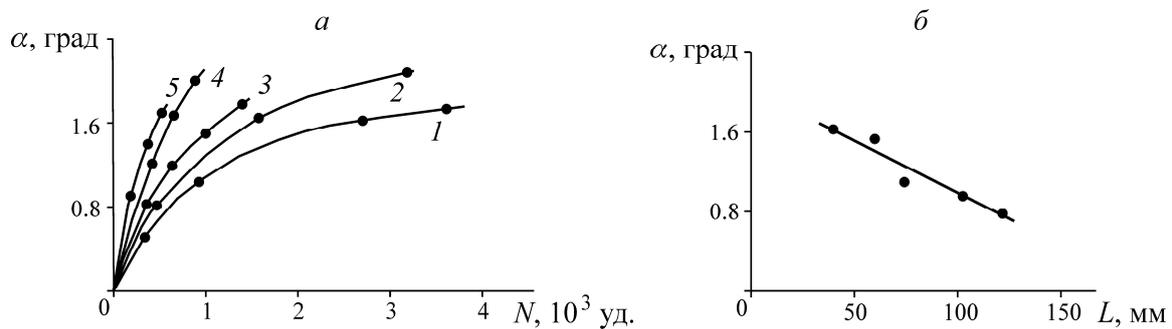


Рис. 6. Значения углов наклона  $\alpha$ : а — в зависимости от числа ударов  $N$  при разных расстояниях ближнего ряда стержней до источника возмущений  $L$ , мм: 1 — 120; 2 — 103; 3 — 75; 4 — 60; 5 — 40; б — в зависимости от расстояния  $L$  при постоянном числе ударов  $N = 400$  уд.

Представленные кривые с увеличением числа инициирующих импульсов демонстрируют затухающий характер процесса. Наиболее сильное затухание возникает в случае, когда платформа расположена на максимальном удалении от источника возмущений (кривая 1). Установлено также, что с приближением платформы к источнику возмущений величина наклона возрастает. Это согласуется с оценками по кривой волновой проводимости среды.

На рис. 6б приведены значения углов наклона в зависимости от расстояния  $L$  ближнего ряда стержней до источника возмущений при постоянном числе импульсных воздействий. Эта зависимость, полученная из кривых рис. 6а, при одинаковом числе ударов  $N = 400$  хорошо аппроксимируется линейной зависимостью.

## ВЫВОДЫ

Разработана, создана и проверена экспериментальная модель для исследования несущей способности платформы с силопередающими элементами, погруженными в сыпучий материал, под воздействием продольных волн от слабых ударов. Эксперименты показывают, что возникновение смещений от кратковременных импульсных нагрузок носит триггерный характер. Волной разгрузки активизируются смещения, которые приводят конструкцию к длительному (на два порядка большему) времени ее заглупления по сравнению с временем действия инициирующего импульса.

Неравномерность смещений вызывает наклон конструкций в сторону источника возмущений вследствие разной интенсивности воздействий на грунт ослабленной волны, проходящей через ближнюю и дальнюю зоны исследуемого объекта. В зависимости от числа импульсных нагрузок величина наклона возрастает с увеличением пригрузки, энергии единичного удара, а также с уменьшением расстояния объекта до источника возмущений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН СССР. — 1987. — Т. 293. — № 1. — С. 67–70.
2. Бобряков А. П. Моделирование триггерных эффектов в разломных зонах горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 35–44.
3. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // ФТПРПИ. — 1997. — № 1. — С. 3–16.
4. Казарновский В. Д. О механизме накопления остаточных деформаций в уплотненных песчаных грунтах под воздействием кратковременных нагрузок // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2008. — № 5. — С. 2–4.
5. Coffin L. E. The significance of cyclic-strain tests in the evaluation of materials, Analytical Methods in the Study of Stress–Strain Behavior, Boston: ASME, 1980. — P. 41–67.
6. Рыбакина О. Г. Феноменологическая теория малоциклового усталости // Актуальные проблемы нелинейной механики сплошных сред. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. — С. 104–131.
7. Троллоп Д. Х., Бок Х., Бей Б. С., Уоллес К. Введение в механику скальных пород: пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 276 с.
8. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Характеристики и соотношения на характеристиках на запредельной стадии деформирования горных пород // ФТПРПИ. — 2008. — № 5. — С. 27–47.
9. Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф. Однородный сдвиг сыпучего материала. Дилатансия // ФТПРПИ. — 1982. — № 5. — С. 23–29.
10. Бобряков А. П. Линии скольжения в сыпучей среде с первоначальной неоднородностью и анизотропией // ФТПРПИ. — 2002. — № 5. — С. 32–39.
11. Молчанов Е. А. Механика триггерного воздействия при искусственном провоцировании землетрясения // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы Всерос. семинара-совещ., 22–24 июня 2010 г. / под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. — М.: Геос, 2010. — С. 96–104.
12. Бобряков А. П., Косых В. П., Ревуженко А. Ф. Распространение в упаковке стеклянных шаров слабых волн от периодических импульсных нагрузок // ФТПРПИ. — 2016. — № 5. — С. 40–47.

*Поступила в редакцию 11/ХII 2016*