

Некоторые результаты лабораторных исследований влияния вибрации на прочностные характеристики связных мелкодисперсных геоматериалов

Е. Г. Куликова^{1,2}

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: e.kulikova@corp.nstu.ru

e-mail: shevchyk_78@mail.ru

Аннотация. Описано влияние прочностных характеристик, а конкретно сцепления и угла внутреннего трения, на условия выпуска и уплотнения дисперсных материалов. Обосновано использование метода физического моделирования при исследовании изменения этих параметров под действием вибрации. Описаны лабораторный стенд, измерительный комплекс и методика проведения экспериментов, выполняемых в два этапа. На первом этапе дисперсный материал нагружался статически, и определялось, что оказывает большее влияние на его прочностные характеристики: влажность или содержание глины. На втором этапе рассматривалось влияние ускорения вибрационного воздействия, дополнительного к статическому, на изменение эффективного сцепления и эффективного угла внутреннего трения дисперсных материалов различных составов и влажности. Сформулированы рекомендации по режимам вибровоздействия на мелкодисперсные материалы, направленные по повышению эффективности и снижению энергоемкости принудительных процессов их перемещения и уплотнения.

Ключевые слова: эффективное сцепление, эффективный угол внутреннего трения, виброускорение, дисперсный материал, влажность, содержание глины, лабораторный стенд, испытания на сдвиг

Some results of laboratory researches of the vibration effect on the cohesive fine-dispersed geomaterials strength characteristics

E. G. Kulikova^{1,2}

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

e-mail: shevchyk_78@mail.ru

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

e-mail: e.kulikova@corp.nstu.ru

Abstract. The effect of strength characteristics, and specifically the cohesion and the angle of internal friction, on the conditions for the displacement and compaction of dispersed materials is described. The employment of the physical modeling method in the researches of these parameters changes under vibration is justified. The laboratory stand, a measuring complex and a technique for experiments performed in two stages are presented. At the first stage, the dispersed material was loaded statically, and the efficiency of moisture and clay content on its strength characteristics was determined. At the second stage, the vibrational acceleration effected, additional to the static one, on the change in the effective cohesion and the effective angle of internal friction of dispersed materials of various compositions and moisture was considered. Recommendations on using of the vibration im-

pact on fine-dispersed materials regimes, directed at the efficiency increase and reducing the energy intensity of the forced processes of their movement and compaction, have been established.

Keywords: effective cohesion, effective angle of internal friction, vibration acceleration, dispersed material, moisture, clay content, laboratory bench, shear tests

Введение

В ИГД СО РАН создано большое количество вибрационной техники для применения в различных технологиях горного и строительного производства [1 – 5]. При разработке таких машин на отдельных этапах исследований рассматривались вопросы транспортирования, уплотнения, разрыхления сыпучих материалов с разными физико-механическими характеристиками, влияющими на эффективность вибрационного воздействия на них и на выбор рациональных режимов работы соответствующих устройств.

Процессы, протекающие в сыпучих материалах под влиянием внешних факторов, напрямую зависят от их механических свойств (гранулометрический состав, плотность, влажность и т.д.), определяющих прочностные характеристики, в частности угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c [6 – 12]. С увеличением последних ухудшаются условия перемещения отдельных частиц материала друг относительно друга, что вызывает необходимость увеличения сил для преодоления сопротивлений механической обработке сыпучего материала. Однако использование вибрации позволяет создать дополнительные силы, распределенные в объеме обрабатываемого материала, при которых его прочностные характеристики зрительно уменьшаются, и он приобретает свойства текучести [13 – 17]. Это позволяет при правильном выборе режимов вибрационного воздействия не только увеличить интенсивность процесса, но и снизить его энергоемкость.

В настоящее время для исследований поведения сыпучих материалов широко используются методы численного моделирования [18 – 22]. Однако из-за разнообразия свойств материалов и широкого диапазона их изменения вследствие тех или иных внешних факторов, таких как влажность окружающей среды, расчетные результаты могут быть или недостаточно точными, или требовать значительной продолжительности расчета. Поэтому для определения закономерностей изменения φ и c мелкодисперсных материалов под действием вибрации различной интенсивности был использован метод физического моделирования.

Методы и материалы

Исследования проводились на стенде, основой которого являлась плита, по периметру зафиксированная на жестком массивном основании. На верхней ее поверхности был закреплен сдвиговой прибор ВСВ-25 (Россия). С его помощью в процессе эксперимента к образцу материала прикладывалась нормальная сила $F_{\text{норм}}$ (рис. 1), значение которой варьировалось от 0 до 0,8 кН, и сдвиговая сила $F_{\text{сд}}$, изменяющаяся в диапазоне от 0 до 2,0 кН. На нижней поверхности опорной плиты непосредственно под сдвиговым прибором был закреплен инерционный вибровозбудитель RZHF 40 компании Knauer Engineering (Германия), величина

вынуждающей силы которого регулировалась изменением как статического момента дебалансов, так и частоты их вращения и не превышала 0,5 кН.

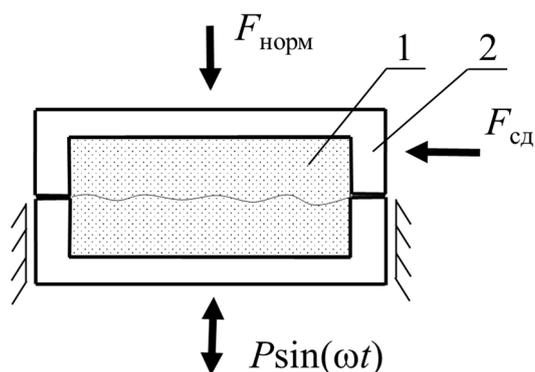


Рис. 1. Схема нагружения образца дисперсного материала

1 – дисперсный материал; 2 – сдвиговый прибор; $F_{сд}$, $F_{норм}$ – статические сдвигающая и нормальная сила соответственно; $P\sin(\omega t)$ – вынуждающая сила виброисточника

В качестве исследуемого материала использовались смеси мелкодисперсного песчаного грунта (содержание песка 70%, глины 1 %) с глиной, принятые в разных пропорциях и при разных значениях влажности в диапазоне 0 – 12%.

Параметры статического нагружения контролировались динамометрическими датчиками сжатия, параметры вибрации – прецизионным шумомером-виброметром с пьезоэлектрическим акселерометром.

На подготовительном этапе образец материала с заданными составом и влажностью помещался в сдвиговый прибор и уплотнялся под действием нормальной силы определенного значения до обеспечения равномерной плотности по всему его объему, что контролировалось стабилизацией показаний соответствующего динамометра.

Первоначально для последующего сравнения были проведены исследования зависимостей сцепления и коэффициента внутреннего трения дисперсного материала от его влажности и процентного содержания глинистой составляющей под статическим нагружением. На этом этапе к каждому образцу при постоянной нормальной нагрузке прикладывалась равномерно увеличивающаяся сдвигающая сила. Соппротивление грунта срезу контролировалось соответствующим динамометром. В момент, когда происходило нарушение целостности исследуемого образца, показание, получаемое с датчика резко падало. Данное значение сдвигающей силы принималось за искомое и использовалось для получения исследуемых зависимостей.

Основные исследования выполнялись при одновременном действии на образец статических и динамических сил. Каждый образец материала предварительно уплотнялся до стабилизации показания датчика сжатия, а затем включался вибропривод и прикладывалась сдвигающая сила.

Полученные данные аппроксимировались прямой в соответствии с законом Кулона [23]:

$$\tau(p) = p \operatorname{tg} \varphi + c,$$

где p – нормальное напряжение; τ – касательное напряжение; $\operatorname{tg} \varphi$, c – коэффициент внутреннего трения и сцепление дисперсного материала соответственно.

По этим прямым определялись значения коэффициента внутреннего трения $\operatorname{tg} \varphi$ и сцепления c смесей различных составов и влажностей, а также эффективное сцепление c^* и эффективный коэффициент внутреннего трения $\operatorname{tg} \varphi^*$ дисперсных материалов под действием вибрации с различными значениями ускорения.

Результаты

Результаты предварительных исследований зависимости коэффициента внутреннего трения и сцепления материала от свойств сыпучего материала приведены на рисунке 2.

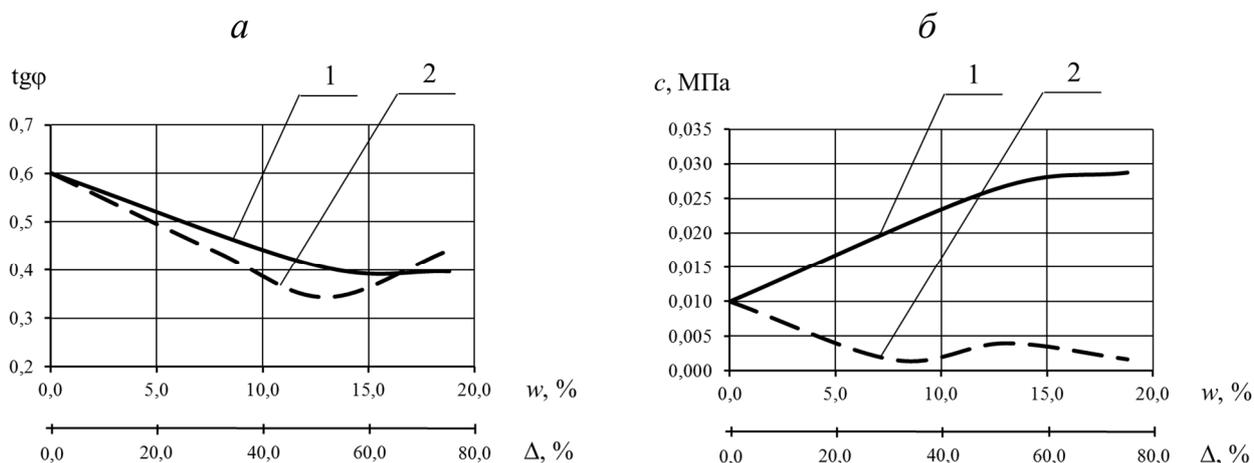


Рис. 2. Зависимость коэффициента внутреннего трения (а) и сцепления (б) материала от свойств сыпучего материала

1, 2 – влияние процентного содержания глинистой составляющей Δ и влажности w соответственно

Известно [17], что взаимодействие частиц дисперсного материала с вибрирующей поверхностью может быть охарактеризовано эффективным коэффициентом трения, который меньше коэффициента трения настолько, насколько повышается интенсивность колебаний. Сопротивление же движению отдельных частиц друг относительно друга под действием вибрации изменяется не так однозначно. На рисунке 3 приведены результаты исследования зависимостей эффективного сцепления c^* и эффективного коэффициента внутреннего трения $\operatorname{tg} \varphi^*$ от величины вибрационного ускорения.

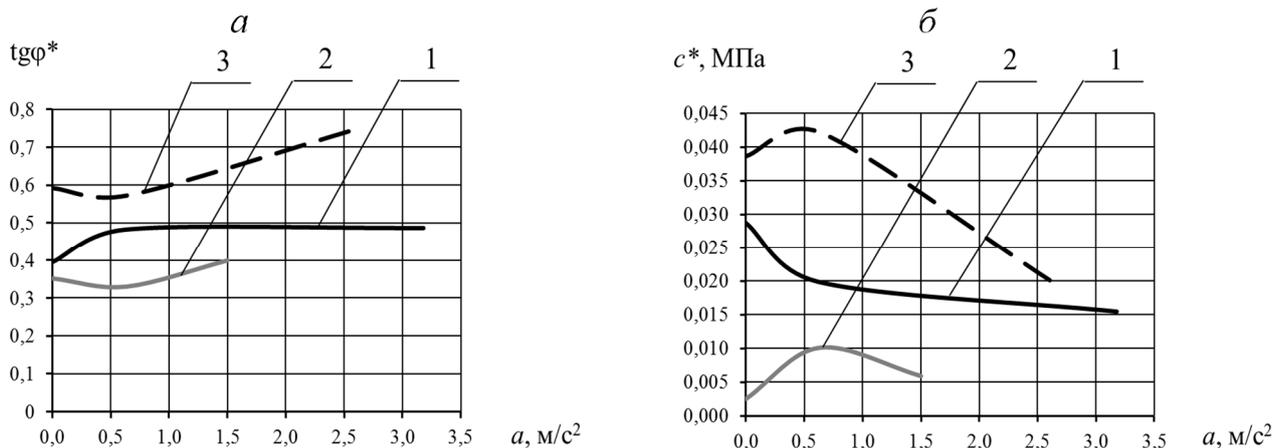


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента внутреннего трения (а) и эффективного сцепления (б) материала от ускорения колебаний опорной поверхности

1, 3 – смесь (25 % песчаного грунта и 75% глины) естественной влажности и влажностью 11,5% соответственно; 2 – песчаный грунт влажностью 11,5%

Обсуждение

Результаты предварительных исследований показали, что увеличение как содержания глинистой составляющей Δ в дисперсной смеси естественной влажности, так и ее влажности w при исходном составе приводят примерно к одинаковому уменьшению коэффициента внутреннего трения $\text{tg}\varphi$ (рис. 2, кривые $a,1$ и $a,2$). Рост Δ до 50 – 55 % и w до 12,5 – 13,5 % сопровождается снижением $\text{tg}\varphi$ примерно в 1,5 – 1,8 раза. Дальнейшее увеличение содержания глины (до 75%) существенно не влияет на эту характеристику материала, а повышение влажности – увеличивает на 25 – 30 %. Таким образом, влияние влажности на изменение $\text{tg}\varphi$ несколько выше, чем влияние фракционного состава.

В свою очередь сцепление c изменяется в основном за счет роста содержания глинистой составляющей (рис. 2, кривые $b,1$ и $b,2$). С его увеличением в указанных пределах c повышается практически в три раза. Однако при $\Delta = 50 - 75$ % эта характеристика материала остается практически без изменения.

Таким образом, сцепление дисперсной смеси изменяется в зависимости от ее состава, а коэффициент внутреннего трения – от влажности. Однако это влияние ограничивается определенными значениями. Для исследуемого сыпучего материала они составили $\Delta = 48 - 50$ %, $w = 10 - 13$ %.

Было установлено, что под действием вибрации искомый $\text{tg}\varphi^*$ (рис. 3, а) ведет себя отлично от эффективного коэффициента трения о транспортирующую поверхность. Так в диапазоне виброускорения от 0 до 0,6 м/с² исследуемый параметр увеличивается на 15 – 20% на сухой смеси дисперсных материалов и практически не изменяется на влажных образцах. С дальнейшим ростом a коэффициент внутреннего трения повышается пропорционально влажности сыпу-

чего материала и содержанию в нем глинистой составляющей. Причем последний фактор проявляется только на влажных смесях. Для сухого материала $\operatorname{tg}\varphi^*$ остается постоянным в рассмотренном диапазоне виброускорений.

Коэффициент сцепления c^* сухой смеси с высоким содержанием глинистой составляющей уменьшается при вибрации. Наиболее интенсивное снижение было зафиксировано при малых значениях виброускорения от 0 до $0,6 \text{ м/с}^2$ и составило 30 – 35%. С дальнейшим ростом a его величина менее сказывается на эффективном сцеплении. Увеличение влажности исследуемой смеси до 11,5 % привело к повышению c^* в 1,4 – 2,1 при низкой интенсивности колебаний. При ускорении $2,5 – 3,0 \text{ м/с}^2$ дисперсный материал ведет себя подобно псевдожидкости, и влияние w на сцепление снижается. Разница между значениями кривых 1 и 3 на рисунке 3, б составляет не более 20 %. В свою очередь снижение содержания глины (рис. 3, б кривые 2 и 3) привело к снижению c^* более чем в 10 раз. Причем это отношение было зафиксировано практически при всех значениях рассматриваемого диапазона частот колебаний прибора.

Заключение

1. Установлено, что при воздействии вибрации на связный дисперсный материал вибрационными нагрузками даже сравнительно небольшой интенсивности (до 4 м/с^2) сцепление и коэффициент внутреннего трения, характеризующие сыпучую среду, изменяются неодинаково. Характер этих изменений зависит в основном от содержания глины в дисперсном материале.

2. С увеличением вибрационного ускорения эффективное сцепление уменьшается. Наиболее существенное уменьшение этого параметра в сравнении с исходным, достигается при вибрировании влажной смеси с большим содержанием глинистой составляющей.

3. Эффективный коэффициент внутреннего трения с ростом вибрационного ускорения увеличивается. Наиболее ярко это проявляется при вибрационном воздействии на влажную смесь с высоким содержанием глинистой составляющей, однако количественное изменение $\operatorname{tg}\varphi^*$ менее существенно, чем изменение сцепления.

4. Для повышения эффективности и снижение энергоемкости принудительных процессов перемещения и уплотнения связных мелкодисперсных материалов необходимо обеспечить такие режимы вибровоздействия, при которых значение виброускорения не превысит $1,5 – 1,7 \text{ м/с}^2$, так как с дальнейшим ростом a , несмотря на снижение сцепления, угол внутреннего трения увеличивается, затрудняя перемещение отдельных слоев материала друг относительно друга.

Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Морозов А. В., Усольцев В. М. Совершенствование процесса формирования автоотвалов при открытой разработке полезных ископаемых // ГИАБ – 2016. – № 1. – С. 96–105
2. Тишков А. Я., Гендлина Л. И., Еременко Ю. И., Левенсон С. Я. Вибрационное воздействие на сыпучую среду при выпуске ее из емкости // ФТПРПИ – 2000. – № 1. – С. 55–60
3. Тишков А. Я. Теория и практика создания машин для выпуска и доставки руды, основанных на принципе бегущей волны: Автореф. дис... докт. техн. наук / А. Я. Тишков; СО АН СССР. Совет секции по прочности материалов и технологии машиностроения Объед. учен. Совета по физ.-мат. и техн. наукам. — Новосибирск, 1974. — 28 с.
4. Morozov A. V., Usoltsev V. M. Compaction of dispersed granular material by a vibratory compactor with polyharmonic oscillation exciter // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science [Electronic resource]. – 2020. – Vol. 523 – doi:10.1088/1755-1315/523/1/012003
5. Kulikova E. G., Dudina A M. Test bench to study drying of geomaterials in vibratory conveying // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science [Electronic resource]. – 2021. – Vol. 773 – doi: 10.1088/1755-1315/773/1/012032
6. Бобряков А. П., Лубягин А. В. Экспериментальное исследование неустойчивых режимов скольжения // ФТПРПИ. – 2008 - № 4 – С. 13-23
7. Месчан С. Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов – М.: Недра – 1985 – 342 с.
8. Мациевский А. С., Пашков М. В., Середин В. В. О механических свойствах глин в условиях нефтеперерабатывающих предприятий // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2016. – Т. 2 – С. 428–431.
9. Колос А. Ф., Осипов Г. В., Клищ С. А., Леус А. С., Каминный О. А. Исследование прочностных свойств щебня, применяемого для балластного слоя железнодорожного пути // Сб.: Научные исследования: ключевые проблемы III тысячелетия. Сборник научных трудов по материалам XXIII Международной научно-практической конференции – 2018. – С. 19–24.
10. Золотарев Л. Р. Изменение механических свойств глинистых грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами // Вестник Пермского университета. Геология. – 2018. – Т. 17. - № 3. – С. 263–267.
11. Осипова О. Н., Удычак М. В., Мовсесян М. А. Влияние изменения природной влажности на механические характеристики грунтов // Сб.: Достижения вузовской науки 2019, сборник статей VII Международного научно-исследовательского конкурса. – 2019. – С. 47–51.
12. Шабаев С. Н. Влияние крупности частиц одноразмерной сыпучей зернистой среды на прочностные характеристики // Вестник Магнитогорского технического университета им. Г. И. Носова. – 2020. – Т. 18. - № 2. – С. 62–70.
13. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные и волновые транспортирующие машины. – М.: Наука, 1983.
14. Блехман И. И. Что может вибрация? – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1988 – 208 с.
15. Ренгач В. Н. Исследование грунтов при динамических нагрузках // Транспортное строительство – 1978 - № 8
16. Красников Н. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения – Л., Стройиздат – 1970 – 240 с.
17. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. – М. – 1964 г. – 412 с.
18. Колос А. Ф., Колос И. В., Конон А. А. Математическая модель прогнозирования несущей способности балластного слоя железнодорожного пути // Известия Петербургского университета путей сообщения – 2017. – Т. 14. - № 4. – С. 578–587.
19. Бобрович А. С. Математическая модель грунта, учитывающая анизотропность его параметров в природной обстановке // Современные проблемы науки и образования – 2007. - № 6. – С. 19.

20. Моисеев К. Г., Терлеев В. В. Расчет коэффициента трения сухих сыпучих сред на основе фрактального моделирования // *Агрофизика* – 2016. - № 4. – С. 9–16.
21. Шмакова М. В. Математическое моделирование движения воды и твердого вещества на примере р. Нева // *Метеорология и гидрология* – 2012. № 2. – С. 102–105.
22. Аль Шемали А. А. Модели Друкера-Прагера для динамического анализа гранулированных материалов в инженерной сейсмологии // *Строительные материалы и изделия* – 2021. – Т. 4 - № 2. С. 5–11.
23. Чураков А. А., Сухин К. А., Кузнецов Д. Г., Вайнгольц А. И. *Механика грунтов: учебное пособие* – Волгоград: ВолгГТУ. – 2017. – 92 с.

© *Е. Г. Куликова, 2022*