

### Выводы

1. Исследование НС, проводимое на основе математического планирования эксперимента, позволило получить зависимости термостойкости от натяга для конических соединений деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло», в том числе с промежуточным тонким токопроводящим слоем. Представленная проверка полученных моделей по  $F$ -критерию Фишера для уровня значимости 0,05 показала их адекватность результатам наблюдений.

2. Планирование эксперимента позволило получить адекватные регрессионные модели термостойкости конических соединений деталей из пары материалов «техническая керамика – стекло» с хромовым покрытием и без него при минимальном количестве опытных образцов – 6 комплектов.

3. Полученные зависимости имеют нелинейный характер, что говорит о сложном влиянии температуры на геометрические параметры сопрягаемых деталей, коэффициент линейного расширения их материалов, а также механику контактного взаимодействия рассматриваемых соединений, в том числе с хромовым покрытием.

### Библиографические ссылки

1. Гаффанов Р. Ф., Щенятский А. В. Математическое моделирование термической сборки с натягом // Интеллектуальные системы в производстве. – 2008. – № 2. – С. 55–59.

2. Фатмиев Ф. Ф. Разработка методов повышения нагрузочной способности и расчета конических соединений : дис. ... канд. техн. наук. Специальность: 01.02.06. Устинов, 1985. – 136 с.

3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / пер. с англ. под ред. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1975. – 541 с. : ил.

4. Газизов Х. Ш., Кузьминых А. А. Расчет соединений с натягом методом конечных элементов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1994. – № 7–9. – С. 58–61.

5. Щенятский А. В., Чухланцев Е. С. Исследование нагрузочной способности поликонтактного неравножесткого соединения с натягом численными методами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1 (21). – С. 167–170.

6. Атопов В. И., Сердобинцев Ю. П., Славин О. К. Моделирование контактных напряжений. – М. : Машиностроение, 1988. – 270 с.

7. Антипов Ю. А. Контактные задачи теории упругости при наличии сцепления и сухого трения : автореф. ... д-ра техн. наук: 01.02.04. – М., 1993. – 27 с.

8. Таблица коэффициентов трения покоя (коэффициентов сцепления) для различных пар материалов (большая). DPVA.info – Инженерный справочник [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication/StartFriction1/>, свободный. – Загл. с экрана.

9. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 280 с.

10. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 1958. – 336 с.

\*\*\*

I. V. Abramov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
P. V. Lekomtsev, Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Experimental studies of the thermal stability of the tapered interference fit of parts made from glass and ceramics

*The article presents a study of the effect of temperature on the strength of the tapered interference fit of parts made from glass and ceramics. As a result of experimental design, the regression models have been obtained, reflecting the dependence of the thermal stability of the interference for considered compounds, including the intermediate thin conductive layer.*

**Keywords:** tapered interference fit, thermal stability, mathematical design of experiments, regression analysis, thermal expansion coefficient, technical ceramics, glass.

Получено: 6.11.14

УДК 624.131

В. П. Баранчик, доктор технических наук, профессор

М. Ф. Закиров, кандидат технических наук, доцент

К. А. Иванов, магистрант

Н. А. Кибардина, магистрант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНОГО ГРУНТА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ МАШИН

*Представлены результаты применения метода дискретных элементов для оценки механических характеристик песчаного грунта при циклическом нагружении. В основу положено сравнение результатов численных экспериментов и результатов лабораторных испытаний, проведенных в Казанском государственном архитектурно-строительном университете. Разработана математическая модель, адекватно отражающая изменение прочностных и деформационных показателей песчаных грунтов при циклическом объемном сжатии. Математическая модель позволяет определять оптимальные параметры и число циклов воздействия рабочего органа машины, при которых обеспечивается отсутствие просадки земляного сооружения заданных размеров.*

**Ключевые слова:** уплотнение грунта, главные напряжения, боковые давления, относительная деформация, модуль деформаций, циклическая прочность, число циклов нагружения, предельная нагрузка, предел прочности, метод дискретных частиц, численные эксперименты, внутренняя энергия системы, энергоёмкость процесса уплотнения грунта.

Физико-механические свойства грунта определяют выбор способа его уплотнения машинами. При этом основными показателями физико-механических свойств, определяющими выбор и режимы работы оборудования, являются модуль деформаций, предел прочности и относительная деформация материала. При заданной влажности эти показатели считаются постоянными, не зависящими от изменения плотности.

Между тем при любом способе уплотнения грунт испытывает циклические нагрузки большей (вибрационный способ) или меньшей (укатка) частоты. На практике частоту вибрационного воздействия, частоту ударов или число проходов машины определяют экспериментально по плотности верхнего слоя.

Как показывает опыт [1], прочностные и деформационные свойства грунтов зависят от числа  $N$  циклов нагружения и величины боковых давлений  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ . После однократного статического воздействия модуль  $E_1$  продольных деформаций  $\varepsilon_1$  монотонно снижается и после  $N=200$  циклов стабилизируется. При этом предел прочности  $\sigma_{1в}$  грунта снижается и принимает постоянное значение после  $N=350$  циклов. Степень снижения предела прочности  $\sigma_{1в}$  зависит от боковых давлений  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ . При  $\sigma_2 = \sigma_3 = 100 \dots 400$  кПа предел прочности  $\sigma_{1в}$  равен соответственно 650, 500, 400, 200 кПа [2]. Отсюда следует, что при уплотнении насыпей и подушки фундаментов существуют оптимальные значения параметров и числа циклов воздействия рабочих органов машин, зависящие не только от механических свойств грунтов, но и от размеров земляного сооружения.

Аналитические зависимости механических свойств грунтов в функции числа циклов, приведенные в [3], использовать затруднительно, т. к. они содержат коэффициенты, значения которых можно

получить только опытным путем, в зависимости от боковых давлений  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  и от влажности грунта. Однако в работе [4] отмечается важный факт, что в одинаковые моменты времени нагружения значение модуля вертикальных деформаций зависит от величины бокового давления и изменяется в 1,8–2,8 раза при изменении бокового давления в 4 раза [5]. Это дает возможность построить зависимость предельной вертикальной нагрузки от относительной вертикальной деформации и числа циклов нагружения при различных значениях бокового давления. Построив графики  $\sigma_{1в}(\varepsilon_1)$  и  $\sigma_{1в}(N)$  при различных  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , можно определить внутреннюю энергию системы, соответствующую минимуму остаточных деформаций грунтового основания, и таким образом получить исходные данные для расчета оптимальных значений параметров процесса уплотнения грунта машинами для конкретных размеров земляного сооружения.

С этой целью авторами разработана математическая модель процесса уплотнения грунтов, основанная на методе дискретных частиц [6–8], позволяющая получить исходные данные для минимизации энергоемкости процесса уплотнения грунтов, имеющих различные физико-механические свойства. С целью проверки адекватности разработанной математической модели были проведены соответствующие численные эксперименты для грунтов и условий нагружения, принятых в работе [9].

Результаты вычислительных экспериментов, полученные с использованием разработанной математической модели, представлены на рис. 1–3. В качестве примера взят песок со следующими физическими характеристиками: плотность –  $2,0 \text{ г/см}^3$ ; влажность – 24 %; угол внутреннего трения –  $35^\circ$ ; число пластичности – 0,325.

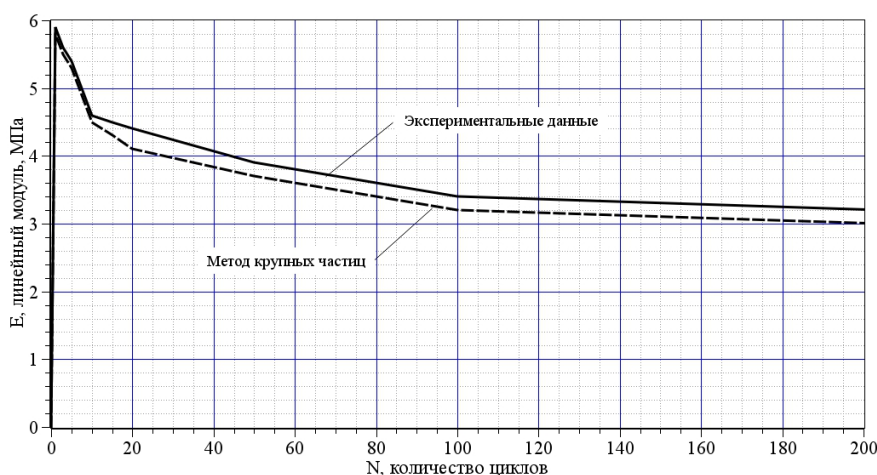


Рис. 1. Влияние числа циклов на изменение линейного модуля деформаций при циклическом испытании песка в стабилометре

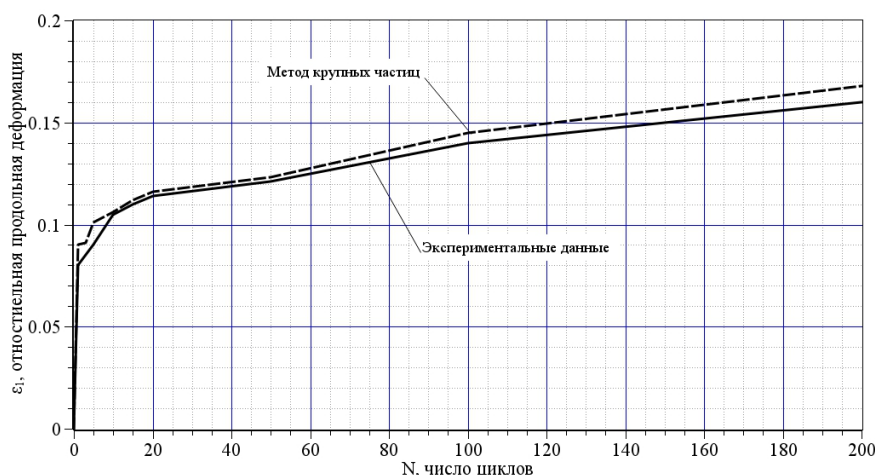


Рис. 2. Влияние числа циклов на изменение значение максимальных относительных продольных деформаций при циклическом испытании песка в стабилометре

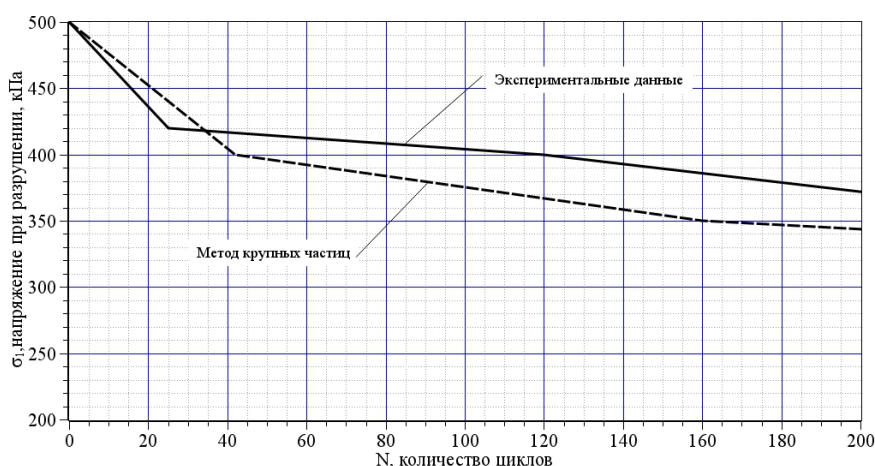


Рис. 3. Кривая Веллера, полученная при циклическом нагружении песка в стабилометре с боковым обжатием  $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$  кПа

#### Выводы:

1. Результаты расчета и эксперимента отличаются менее чем на 8,8 %, что позволяет рекомендовать метод крупных частиц при расчетах сопротивления и режимов уплотнения грунтов машинами.

2. Разработанная математическая модель позволяет определить минимум энергии, необходимой для уплотнения земляного сооружения заданных размеров, при котором будет отсутствовать просадка поверхности сооружения под действием заданной внешней нагрузки.

3. Результаты расчетов и экспериментов позволяют сделать ряд практических выводов, относящихся к проектированию земляных сооружений, испытывающих циклическую нагрузку [10]:

- линейный модуль деформаций грунта при сжатии снижается в 1,8–2,8 раза, в зависимости от бокового давления  $\sigma_2 = \sigma_3 = 100\text{--}400$  кПа, и стабилизируется после 350 циклов нагружения;

- напряжение при разрушении после 350 циклов сжатия и боковом давлении  $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$  кПа ниже статического в 1,32 раза;

- уплотнение насыпей при одних и тех же размерах требует большего числа проходов катка или чис-

ла циклов трамбующей машины по сравнению с уплотнением грунта в котлованах и траншеях;

- назначение частоты вибрационных воздействий рабочего органа трамбующей машины, с позиции снижения энергозатрат, должно зависеть от декремента затухания колебаний и связанного с ним сдвига фазы между силой и деформацией среды, поэтому определение частоты воздействия требует дополнительного изучения.

#### Библиографические ссылки

1. Мирсаянов И. Т., Брехман А. И., Королёва И. В. [и др.]. Прочность и деформации песчаных грунтов при трехосном циклическом нагружении // Известия КГАСУ. – 2012. – № 3 (21).
2. Там же.
3. Там же.
4. Там же.
5. Там же.
6. Баранчик В. П., Иванов К. А. Моделирование процесса перемещения и перемешивания частиц сыпучего материала под действием бульдозерного отвала // Проблемы и достижения строительного комплекса : тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Стройкомплекс-2013». – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2013.

7. Scholtes L., Hicher P. - Y., Nicot F., Chareyre B, Darve. F. On the capillary stress tensor in wet granular materials. – Int. J. For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 01/30/2009.

8. Kozicki J. Donze VF. YADE-OPEN DEM: an open-source software using discrete element method to simulate granular material. Engineering Computations 2009, 26 (7): 786–805.

9. Мирсаянов И. Т., Брехман А. И., Королёва И. В. [и др.]. Указ. соч.

10. Баранчик В. П. Рациональная толщина слоев дорожной одежды автомобильных дорог // Проблемы и достижения строительного комплекса : тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Стройкомплекс-2013». – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2013.

\*\*\*

V. P. Baranchik, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

M. F. Zakirov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

K. A. Ivanov, Master's Degree Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

N. A. Kibardina, Master's Degree Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Defining mechanical properties of the sand soils under cyclic loads by machines actuators

*The paper presents the results of applying the method of discrete elements to evaluate mechanical properties of sandy soils under cyclic loading. It is based on a comparison of the results of numerical experiments and the results of laboratory tests conducted at the Kazan State University of Architecture and Construction. A mathematical model adequately reflects the change in the strength and deformation parameters of sandy soils under cyclic compression volume. The mathematical model permits to determine the optimal parameters and the number of cycles of the machine actuator exposure for which the absence of drawdown of soil construction with specified sizes is provided.*

**Keywords:** soil compaction, principal stresses, lateral pressure, relative deformation, module deformation, cyclic strength, number of loading cycles, limit load, ultimate strength, method of discrete particles, numerical experiments, internal energy of the system, power consumption of process compaction.

Получено: 15.08.14

УДК 621.833

В. И. Гольдфарб, доктор технических наук, профессор

Институт механики

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### НАУЧНАЯ ШКОЛА ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ СПИРОИДНЫХ ПЕРЕДАЧ

*В докладе приводится краткая историческая информация и направления развития теории проектирования спироидных передач и редукторов в Институте механики ИжГТУ, аспекты освоения и развития их производства на предприятиях ООО «Механик».*

**Ключевые слова:** спироидные передачи и редукторы, теория проектирования, освоение производства.

#### Введение

История существования зубчатых передач насчитывает тысячелетия и наполнена большим количеством замечательных событий и выдающихся инженеров и ученых, благодаря которым этот вид техники стал незаменимым. За многие годы появились сотни видов и разновидностей передач, создана стройная теория зубчатых зацеплений, одним из выдающихся творцов которой является проф. Ф. Л. Литвин [1–3 и др.], разработаны эффективные технологии производства передач, оборудование и инструмент для их реализации. Этот процесс, получивший активное развитие в 19-м и 20-м столетиях, продолжается с наименьшей интенсивностью в настоящее время, находя новые формы и направления развития.

Одним из таких событий, обративших на себя внимание специалистов, стало изобретение талантливым инженером Oliver Saari в 1954 г. спироидной передачи [4], которая благодаря особенностям геометрии и кинематики зацепления и, как следствие, высокой нагрузочной способности, износостойкости, стойкости против ударных и вибрационных нагрузок, технологичности изготовления и монтажа и ряду

других достоинств [5], заняла достойное место среди других передач с перекрещивающимися осями. Первое и достаточно подробное описание передачи и метода ее проектирования было дано в работах W. Nelson [6], а пионером в организации производства спироидных передач и редукторов и широком ее внедрении в различные области техники стала корпорация Illinois Tool Works (США), которая запатентовала названия SPIROID и HELICON (разновидность спироидной передачи с цилиндрическим червяком, также изобретенная O. Saari [7]) и в 60–70-е гг. издала обстоятельные каталоги, рекламирующие успешное применение передач в станкостроении, подъемно-транспортной и военной технике, в точных приборах и других областях и демонстрирующие их большие возможности, в том числе возможность получения в одной паре передаточных отношений от 8 до 360.

В России (тогда это был СССР) изучением спироидных передач стали заниматься в Ижевском механическом институте (с 1993 г. Ижевский государственный технический университет) молодые ученые Б. Д. Зотов и Н. С. Голубков. Были изготовлены и ис-