

Сопротивление песчаных грунтов сдвигу при воздействии вибрации

В ряде случаев, находясь под воздействием вибрационных нагрузок, грунты снижают свою прочность за счет снижения сопротивления сдвигу. Проф. П.Л. Иванов установил опытным путем, что снижение прочности песчаных грунтов обусловлено динамической составляющей вибрационного воздействия. Но как теоретически определить эту динамическую составляющую и использовать в практике проектирования – неизвестно.

В статье раскрывается методика теоретического определения динамической составляющей, которая снижает прочность песчаного грунта. Для исследования был использован мелкозернистый песок, отсыпанный в насыпях железнодорожной линии Сургут – Нижневартовск. В насыпи замерялись параметры колебаний от воздействия поездной нагрузки. Для этой цели в насыпь были установлены датчики виброперемещения, виброускорения и мессдозы. При прохождении поезда на аналого-цифровой преобразователь записывались осциллограммы колебаний. С помощью мессдоз замерялось давление в насыпи от подвижного состава. Данные позволили найти функцию динамической составляющей, которая дает возможность прогнозировать снижение прочности песчаного грунта.

Для получения величины угла внутреннего трения опытным путем в лабораторных условиях были проведены исследования песков на специально изготовленном для этой цели динамическом безынерционном стабилометре, где инерция прикладываемых нагрузок на образец отсутствует (это было достигнуто за счет того, что вертикальная и боковая нагрузки создавались гидронасосами). Динамика на образец создавалась при помощи вибростенда ВЭДС-100.

Для проведения опытов песок отбирался в железнодорожной насыпи, где проводились замеры параметров колебаний от воздействия поездной нагрузки.

В стабилометре создавались вертикальное и боковое давления, соответствующие напряжениям, которые имели место в реальных условиях от собственного веса грунта, верхнего строения пути и поездной нагрузки. При этом боковое давление прикладывалось и оставалось постоянным, а вертикальное давление увеличивалось с одновременным вибродинамическим воздействием. В опытах интенсивность вибрации постепенно увеличивалась от значений ускорений, равных 0,1g, до необходимых. Время вибрации при каждом режиме колебаний принималось 60 с. Интенсивность вибраций увеличивалась до тех пор, пока деформация образца не начинала резко увеличиваться. Критическим воздействием считалось то, при котором нарушалась линейная зависимость ускорений и деформаций образца.

По опытным данным, снижение угла внутреннего трения при динамике для песчаных грунтов составляет 3°, т.е. он уменьшается примерно на 7 %.

Ключевые слова: сопротивление грунтов сдвигу, динамическая составляющая нормального давления, мелкозернистый песок, осциллограммы колебаний, амплитуды и частоты колебания, модуль упругости грунта, скорость распространения продольной волны, безынерционный стабилометр, вибростенд, индикатор перемещений.

Опыты показывают, что при воздействии вибрации в песчаных грунтах происходит сопротивление грунта сдвигу, которое снижает его прочность. Считалось, что это явление связано с тем, что при динамике уменьшается угол внутреннего трения грунта [1, 2].

Проведя опыты по исследованию прочности песчаных грунтов, проф. П.Л. Иванов [3] показал, что угол внутреннего трения при вибрации остается постоянным, а меняется лишь динамическая составляющая нормального давления $\Delta\sigma$. Тогда снижение сопротивления песчаных грунтов сдвигу по Кулону можно записать как

$$\tau = (\sigma - \Delta\sigma) \operatorname{tg} \varphi. \quad (1)$$

При вибрационном испытании грунтов на сдвиг динамическую составляющую нормального давления обычно задают изменяющейся по гармоническому закону во времени t :

$$\Delta\sigma = \sin(2\pi t / T), \quad (2)$$

где T – период колебаний.

Тогда касательные напряжения грунта при сдвиге в моменты времени t можно представить в виде

$$\tau = [\sigma \pm \sin(2\pi t / T)] \operatorname{tg} \varphi. \quad (3)$$

С течением времени пластические подвижки грунта накапливаются, поэтому предельное состояние грунта можно записать следующим образом:

$$\frac{\tau_n}{\sigma_n} = \left(1 - \frac{\Delta\sigma_n}{\sigma_n} \right) \operatorname{tg} \varphi. \quad (4)$$

Если ввести динамический угол внутреннего трения, равный $\operatorname{tg} \varphi_d = \frac{\tau_n}{\sigma_n}$, то будем иметь

$$\operatorname{tg} \varphi_d = \left(1 - \frac{\Delta \sigma_n}{\sigma_n}\right) \operatorname{tg} \varphi. \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что динамический угол внутреннего трения не является постоянной величиной, а зависит от отношения $\frac{\Delta \sigma_n}{\tau_n}$ (рис. 1).

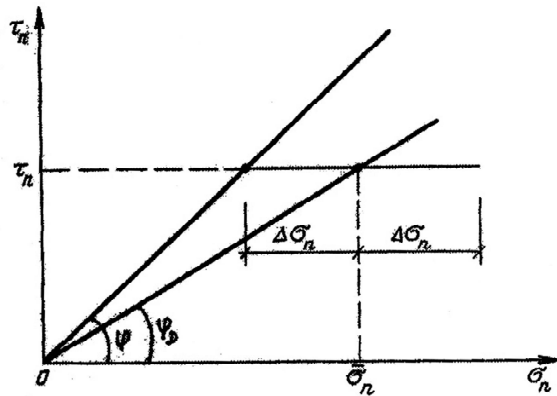


Рис. 1. Сопротивление песчаных грунтов сдвигу: 1 – при статике; 2 – при динамике

Полагая, что относительная деформация грунта при вибрации происходит в условиях, близких к компрессионному сжатию, получим:

$$\varepsilon_x = \beta \frac{\Delta \sigma_n}{E_{\text{упр}}}, \quad (6)$$

где β – коэффициент, определяемый известной формулой

$$\beta = 1 - 2\nu / (1 - \nu); \quad (7)$$

$E_{\text{упр}}$ – модуль упругости грунта; ν – коэффициент Пуассона.

В плоской продольной волне колебаний деформация грунта будет иметь следующий вид [4]:

$$\varepsilon_x = K - 2L(x - c_1 t), \quad (8)$$

где K, L – параметры волны:

$$K = 8Af / c_1, \quad (9)$$

$$L = 8Af^2 / c_1^2, \quad (10)$$

где A – амплитуда колебаний, мк; f – частота колебаний, Гц; c_1 – скорость распространения продольной волны.

Приравнявая (6) и (8), получим

$$K - 2L(x - c_1 t) = \beta \frac{\Delta \sigma_n}{E_{\text{упр}}}. \quad (11)$$

В выражении (9) деформация грунта внутри волны изменяется по линейному закону $\varepsilon_x = K$ на заднем фронте и $\varepsilon_x = -K$ на переднем фронте волны, соответственно меняется и $\Delta \sigma_n$. Наибольшее ее значение определяется формулой

$$\Delta \sigma_n = \frac{1}{\beta} E_{\text{упр}} K. \quad (12)$$

Подставляя в (11) значение для K из выражения (9), получим

$$\Delta \sigma_n = 8E_{\text{упр}} Af / \beta c_1. \quad (13)$$

Записанные автором осциллограммы колебаний при прохождении поездов в различных точках железнодорожной насыпи, сложенной мелкими и пылеватыми песками, по линии Сургут – Нижневартовск, показывают, что колебания представляют сложный нестационарный процесс колебаний [5–8].

Анализ и обработка таких осциллограмм производилась следующим образом. На выделенном участке осциллограммы достаточной длины снимались амплитуды и соответствующие им периоды колебаний. Частота вычислялась как величина, обратная периоду. Результаты определения изображались графически. На рис. 2 приведен один из многочисленных графиков, построенных таким образом.

На рисунке видно, что величины амплитуд колебания имеют широкий диапазон и тенденцию к уменьшению значений с увеличением частоты.

Расчетные параметры амплитуд и частоты колебаний были получены методом регрессионного анализа. Для установления регрессии было определено, что наилучшим образом описывает зависимость амплитуд колебаний от частоты экспоненциальная функция вида

$$A_z = A_0 e^{-\delta f}, \quad (14)$$

где A_0 – начальные амплитуды вертикальных колебаний, мк; δ – параметр затухания амплитуд по частоте колебаний, $\delta = 0,032$ с; f – частота колебаний, Гц.

Учитывая (13), динамическая составляющая $\Delta \sigma_n$ будет иметь вид

$$\Delta \sigma_n = \frac{8E_{\text{упр}}}{\beta c_1} A_0 e^{-\delta f} f, \quad (15)$$

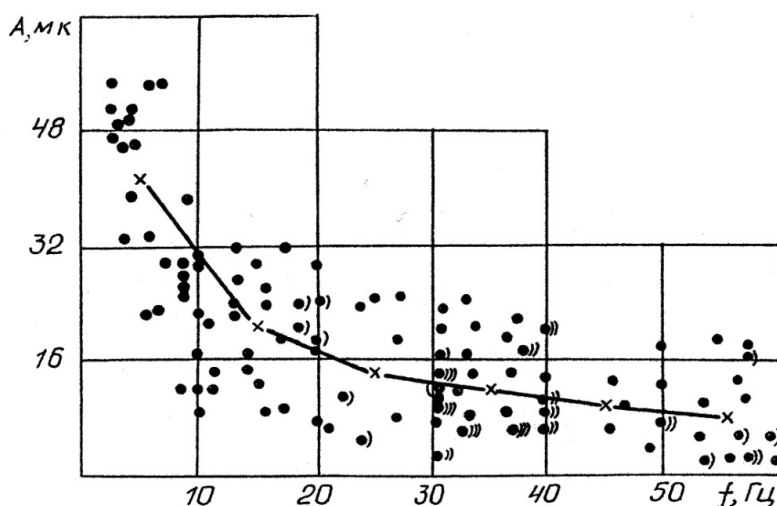


Рис. 2. Амплитудно-частотный спектр колебаний грунта насыпи под осью рельса на уровне основной площадки (нагрузка на ось вагона 107 кН, скорость поезда 60 км/ч)

где c_1 – скорость распространения продольных волн в упругой среде.

Значение c_1 рассчитывается по формуле

$$c_1 = \sqrt{\frac{(1-\nu)E_{\text{упр}}}{(1+\nu)(1-\nu)\rho}}, \quad (16)$$

где ρ – плотность грунта, т/м³.

Из этого выражения можно определить максимальную частоту, при которой значение $\Delta\sigma_n$ будет максимальным. С этой целью берется производная $\Delta\sigma_n$ по f :

$$\frac{\Delta\sigma_n}{df} = \frac{8E_{\text{упр}}}{\beta c_1} A_0 e^{-\delta f} (1 - \delta f) = 0. \quad (17)$$

Отсюда $f = 1/\delta = 32$ Гц (рис. 3), что равно максимальному значению ускорений колебаний. В результате получим выражение для динамической составляющей $\Delta\sigma_n$:

$$\Delta\sigma_{\text{max}} = \frac{91,9 f E_{\text{упр}}}{\beta c_1}. \quad (18)$$

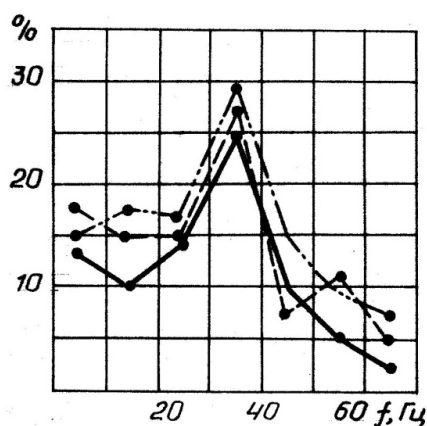


Рис. 3. Полигоны амплитуд по частоте колебаний

Используя выражение (16), можно исключить $E_{\text{упр}}$, и тогда получим простое выражение для $\Delta\sigma_{\text{max}}$:

$$\Delta\sigma_{\text{max}} = 91,9 A_0 \rho c_1. \quad (19)$$

Таким образом, динамический угол внутреннего трения в расчетной области устойчивости песчаного земляного полотна, используя формулу (1), запишем следующим образом:

$$\tau_n = (\sigma_n - 91,9 A_0 \rho c_1) \operatorname{tg} \varphi. \quad (20)$$

Значение величины максимальной амплитуды колебания при динамическом воздействии на песчаные грунты определяется опытным путем. Автором были получены максимальные амплитуды колебаний в песчаных железнодорожных насыпях при прохождении поездов с нагрузкой 230 кН на ось со скоростью 90 км/ч (рис. 4).

Определение скорости распространения упругих продольных волн в грунтах c_1 обычно производится методом полевой сейсморазведки, сейсмокаротажа или прозвучивания грунтов между скважинами. В лабораторных условиях измерение скоростей упругих волн в образцах грунтов производится ультразвуковым способом [9]. В ГОСТ 12248–2010 имеются таблицы скоростей распространения упругих волн в различных грунтах [10].

Расчетное давление σ_n на основную площадку железнодорожного земляного полотна определяется по следующей формуле [11]:

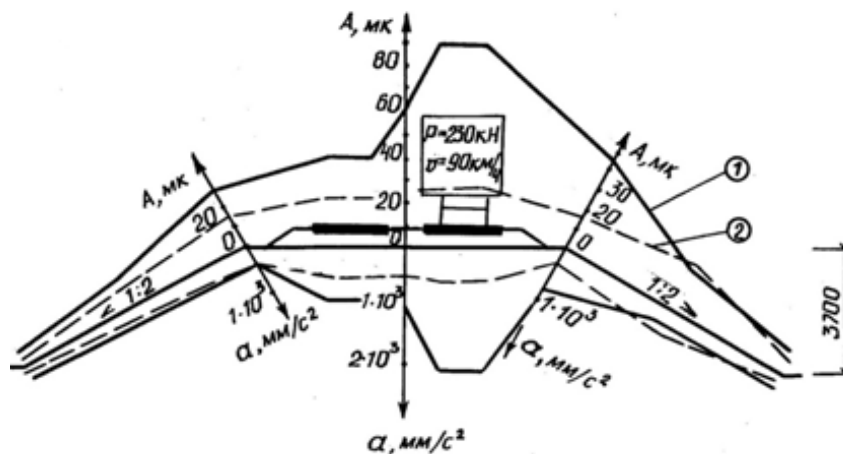


Рис. 4. Распределение максимальных вертикальных 1 и горизонтальных 2 амплитуд и ускорений колебаний в насыпи при прохождении подвижного состава

$$\sigma = \frac{4p_{\text{ось}}}{2,7l} + q_{\text{в}}, \quad (21)$$

где $p_{\text{ось}}$ – расчетная нагрузка на ось подвижного состава, кН; l – длина расчетной единицы состава (вагона, тепловоза, электровоза), м; $q_{\text{в}}$ – удельное давление верхнего строения пути на основную площадку.

Если задаться средней скоростью распространения продольных волн для мелких песков $c_1 = 380$ м/с, плотностью (согласно опытным данным) $\gamma = 17,9$ кН/м³ и замеренной амплитудой колебаний в уровне основной площадки (при скорости поезда 90 км/ч) $A_0 = 73$ мк, то, подставляя эти значения в формулу (20), получаем

$$\tau_n = (\sigma_n - 2,3) \text{tg} \varphi. \quad (22)$$

По опытным данным, угол внутреннего трения мелкозернистого песка при коэффициенте пористости $e = 0,6$ равен $\varphi = 32^\circ$. Подставляя φ в формулу (22), получаем уменьшение сопротивления сдвигу за счет динамической составляющей на 4 %.

Для выяснения того, в какой мере динамика оказывает влияние на прочность песчаных грунтов, были проведены специальные лабораторные опыты по определению угла внутреннего трения песков при статических и динамических нагрузках. Для опытов пески отбирались в железнодорожной насыпи, где проводились измерения параметров колебаний грунтов насыпи от воздействия поездной нагрузки. Исследования выполнялись на специально изготовленном для этой цели динамиче-

ском безынерционном стабилометре, где инерция прикладываемых нагрузок на образец отсутствует. Это было достигнуто за счет того, что вертикальная и боковая нагрузки создавались гидронасосами. Динамическое воздействие на образец создавалась при помощи вибростенда ВЭДС-100. После зарядки стабилометр жестко крепился на столе вибростенда. Затем создавались вертикальное и боковое давления, соответствующие напряжениям, которые имели место в реальных условиях от собственного веса грунта, верхнего строения пути и поездной нагрузки. При этом боковое давление прикладывалось и оставалось постоянным, а вертикальное давление увеличивалось с одновременным вибродинамическим воздействием.

Деформация образца от вертикальной нагрузки осуществлялась индикатором перемещения часового типа, соединенным с медицинской иглой. Игла упиралась через образец в поршень вертикального давления стабилометра. При вибрации образец вертикально деформировался, и по индикатору перемещения фиксировались его осадки.

В опытах интенсивность вибрации постепенно увеличивалась от значений ускорений $0,1g$ до необходимых. Время вибрации при каждом режиме колебаний принималось 60 с. Интенсивность вибраций увеличивалась до тех пор, пока деформация образца не начинала резко увеличиваться. Критическим воздействием считалось то, при котором нарушалась линейная зависимость ускорений и деформаций образца.

Как при статических, так и при динамических нагрузках исследовался грунт при плотности сухого грунта $\rho_d = 1,56 \text{ г/см}^3$ и коэффициенте пористости $e = 0,70$. Образец опытного грунта вначале обжимался всесторонним давлением, равным 20 кПа, а затем разрушался возрастающим осевым давлением при постоянном динамическом воздействии.

Динамическое воздействие создавалось при частоте колебаний $f = 20 \text{ Гц}$ и ускорении $a = 1,65 \text{ м/с}^2$. По опытным данным, снижение угла внутреннего трения при динамике для песчаных грунтов составляет 3° , т.е. он уменьшается примерно на 7 %.

Отмечено, что величина угла внутреннего трения при стабилометрических испытаниях несколько больше, чем при испытаниях в условиях плоского среза на сдвиговом приборе.

Формулу (20) можно применять для определения динамического угла внутреннего трения и для других объектов, где основанием служат песчаные грунты и где эти грунты подвержены техногенной или тектонической динамической нагрузке. При этом необходимо опытным путем определять амплитуды или ускорения колебаний, скорости распространения продольных волн в грунте и знать действующую нагрузку на основание.

Библиографический список

1. Баркан Д.Д. Виброметод в строительстве. М.: Госстройиздат, 1959. 315 с.
2. Боголюбчик В.С., Хаин В.Я. Определение свойств мелкого песка при одновременном действии статической и динамической нагрузок // Свойства грунтов при вибрациях: Сб. науч. тр. Ташкент, 1975. С. 93–95.
3. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1985. 352 с.
4. Соловьев Ю.И., Караулов А.М., Смолин Ю.П. Современные методы расчета устойчивости земляного полотна железных дорог. Новосибирск, 1996. 82 с.
5. Смолин Ю.П. Прочность железнодорожных насыпей, сложенных мелкими и пылеватыми песками, воспринимающими динамическое воздействие от подвижного состава: Дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2005. 271 с.
6. Стоянович Г.М. Распределение колебаний в грунтах выемок и их влияние на устойчивость откосов // Вопросы земляного полотна на дорогах Дальнего Востока: Межвуз. сб. науч. тр. Хабаровск: ХаБииЖТ. 1991. С. 29–36.
7. Ставницер Л.Р. О распределении грунтов сдвигу и устойчивости оснований при сейсмических колебаниях // Свойства грунтов при вибрациях. Ташкент, 1975. С. 148–154.
8. Смолин Ю.П. Напряжения в земляном полотне от поездной нагрузки // Изв. вузов. Стр.-во. 1997. № 7. С. 98–101.
9. Забылин М.И. Исследование упругих свойств грунтов // Изв. вузов. Стр.-во и архитектура. 1975. № 10. С. 159–162.
10. ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М., 2010.
11. Смолин Ю.П., Востриков К.В. Учет динамической нагрузки при проектировании усиления деформирующегося железнодорожного земляного полотна методом напорной инъекции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1 (37). С. 89–94.

Yu.P. Smolin

Shear Strength of Sandy Soils under Vibratory Loads

In some cases, soils under vibratory loads lose their strength because of a reduced value of shear resistance. In his experiments, Prof. P.L. Ivanov has found that the strength reduction in sandy soils was due to the dynamic component of the vibratory action. However, the way in which this dynamic component could be determined theoretically and used in practical design remained unknown.

The present paper describes a procedure for theoretical determination of a dynamic component acting to reduce the strength of sandy soils. The study was performed using fine-sand specimens taken from Surgut-Nizhnevartovsk railroad body. In the spoil bank, characteristics of train-load-induced vibrations were measured. To this end, vibration displacement and acceleration sensors and earth pressure cells were installed in the spoil banks. During the passage of a train, an analog-to-digital converter registered oscillographic traces of earth vibrations. With the

help of earth pressure cells, the bank pressure due to the rolling stock was measured. The data gained have allowed determination of a dynamic-component function permitting prognostication of sandy-soil strength reduction.

For experimental determination of the angle of internal friction under laboratory conditions, we carried out tests on a specially designed lag-free dynamic stabilometer in which the loads applied to the sample were zero-delay ones. The zero-lag property of the stabilometer was achieved due to the fact that both the vertical and lateral loads in it were produced by hydraulic pumps. The dynamic loads applied to the sample were generated by a VEDS-100 vibration testing machine.

In the tests, the sand specimens were taken from the railroad body in which characteristics of the vibrations due to the train load were measured.

In the stabilometer, vertical and lateral pressures like those under real conditions due to the soil weight, the track structure, and the train load were generated. In the tests, the applied lateral pressure remained fixed, whereas the vertical pressure increased together with the concomitant vibratory dynamic action. The vibration intensity gradually increased from acceleration values of 0.1g to some necessary values. In each vibratory regime, the vibration duration was 60 s. The vibration intensity was increased until the deformation of the sample started exhibiting a sharp growth. As the critical action, we adopted the action at which the linear dependence of the accelerations and deformations in the sample was violated.

According to experimental data, the reduction in the angle of internal friction in sandy soils under dynamic loads amounted to 3°, this value being approximately 7 % smaller than that without a vibratory load.

Key words: *soil resistance to shear; dynamic component of normal pressure; fine sand; vibration oscillograms; vibration amplitudes and frequencies; soil's modulus of elasticity; velocity of propagation of a compressional wave; lag-free stabilometer; vibration testing machine; displacement indicator.*

Смолин Юрий Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Геология, основания и фундаменты» СГУПС. E-mail: yurij.smolin@bk.ru