

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ

*Н.Н. Рубан, Национальный горный университет, Украина*

Приведен анализ основных результатов исследований, направленных на изучение влияния вибродинамических нагрузок на прочностные и деформационные свойства грунтов, а также влияние длительного приложения нагрузки на ползучесть скелета грунта.

В условиях плотной городской застройки в связи с интенсивным развитием городов и ростом населения возникает острая потребность в новых площадях под строительство объектов социальной, промышленной, культурной и другой инфраструктуры города. Некоторые здания и сооружения со временем оказываются устаревшими, не соответствующими растущим запросам и потребностям городского населения, некоторые из них требуют реконструкции, перепрофилирования или переоборудования производственных предприятий, что зачастую ведет к увеличению полезных нагрузок на строительные конструкции. В результате интенсивного развития города, возникают трудности с функциональным зонированием города, вследствие чего стираются границы между жилыми застройками, промышленными и транспортными зонами.

В таких условиях все сложнее соблюдать нормативные предельные нагрузки на уже существующие здания, возникает острая необходимость в новых способах строительства, реконструкции и укрепления зданий на урбанизированных территориях, в новых методах расчета для учета всех возможных статических и динамических воздействий на новые и существующие сооружения.

Вибрационные и виброударные нагрузки на здания и сооружения оказывают существенное влияние на их прочность и долговечность. При этом, последствия воздействия длительных нагрузок, связанных со строительными работами, движением транспортных средств, особенно рельсовых, могут приводить к не менее серьезным последствиям для несущей способности сооружений, чем единичные мощные виброударные нагружения, например такие, как сейсмические нагрузки.

Помимо изменений состояния самой конструкции вибрация вызывает изменения свойств грунта, на котором установлено здание. Одним из таких изменений является локальное уплотнение грунта, которое может привести к повреждению конструкции из-за неравномерной осадки под фундаментом здания. Если вибрация носит долговременный характер, то уплотнение грунта может произойти даже на большом расстоянии от источника вибрации, когда уровень вибрации мал и не способен оказать существенного прямого воздействия на конструкцию здания. Еще более опасным явлением является разжижение грунта и потеря им несущей способности под воздействием вибрации.

Долгое время одни авторы изучали закономерности изменения прочностных и деформационных свойств грунтов в условиях динамических воздействий, другие, практически изолировано от предыдущих, изучали реакции сооружений на колебания, принимая, для упрощения разрабатываемых расчетных моделей, прочностные и деформационные характеристики постоянными [1].

Поэтому, **целью данной работы** является анализ исследований, проведенных в области механики грунтов для прогноза потери устойчивости и несущей способности оснований сооружений при длительных динамических воздействиях. Так как этот вопрос затрагивает такие разделы механики грунтов, как реология и динамика грунтов, то для выполнения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи: 1) проанализировать работы, выполненные по изменению прочностных и деформационных свойств при действии динамических нагрузок; 2) выполнить анализ исследований в области реологических свойств грунтов.

Под динамической неустойчивостью грунтов следует понимать увеличение деформируемости и снижение прочности, а в более широком смысле – повышение вероятности разрушения

грунта при динамическом нагружении по сравнению со статическими условиями. Динамическая неустойчивость охватывает все задачи, связанные со снижением жесткости и прочности грунтов при динамических нагрузках разного происхождения. Землетрясения, взрывы при экскавациях, движущийся транспорт, работа тяжелых машин, ветровые и волновые нагрузки часто приводят к повреждениям зданий и других инженерных сооружений в результате значительных и неравномерных осадок, смещений пород на склонах, разрушении насыпей.

Возникновение научного направления динамики грунтов в первую очередь связано с бурным развитием в начале XX века техники вообще и строительством автомобильных и железных дорог в частности, а интенсивное развитие получило преимущественно в послевоенный период. Чрезвычайно важными стали вопросы работы насыпей и земляного полотна дорог под действием динамических нагрузок, формирования свойств искусственно уплотненных грунтов, а также разработки методов их динамического уплотнения. Также большое значение на развитие этого раздела в механике грунтов сыграли тяжелые последствия, вызвавшие жертвы и причинившие огромный ущерб, землетрясения в 1964 г.: у берегов Аляски близ Анкориджа и в Ниигате (Япония).

Основы теории распространения волн в упругой (или вязкоупругой) сплошной среде были заложены в 1904 г. работой Т. Лэмба о колебаниях упругого полупространства, вызванных сосредоточенной силой (динамическая задача Буссинеска).

Работы, заложившие теоретические основы расчета фундаментов сооружений в условиях динамических нагрузок принадлежат О.Я. Шахтеру (1948, 1953), Д.Д. Баркану (1948), О.А. Савинову (1955, 1959). В этих работах впервые исследовалось влияние вибрации разной интенсивности на компрессионную сжимаемость грунтов оснований (главным образом, песчаных), вводилось понятие «критического ускорения» колебаний.

Особое место среди работ, посвященных вопросам тиксотропии в связных грунтах, занимают фундаментальные исследования Г. Сиды и К. Чена (Seed, Chan, 1957).

Заметный прогресс в изучении закономерностей поведения грунтов и расчетах колебаний сооружений в условиях динамических нагрузок связан с работами Н.Н. Маслова (1959, 1961), Б.М. Гуменского (1961, 1965), И.М. Горьковой (1961, 1964), П.Л. Иванова (1966, 1968), Л.К. Танкаевой (1964).

Вопросами динамики грунтов занимались также и многие другие авторы, специалисты по инженерной геологии, геотехнике и строительству. Такое междисциплинарное значение связано с тем, что работа фундаментов всех инженерных сооружений в условиях динамических нагрузок определяется следующими тремя основными группами взаимодействующих и взаимосвязанных факторов:

- свойствами грунтов основания;
- параметрами динамической нагрузки и схемой ее передачи сооружению;
- материалом, конструкцией и характером сопряжения фундамента с основанием.

С развитием научного направления динамики грунтов при расчете сооружений на динамические воздействия достаточно хорошо описан расчет и проектирование фундаментов машин и оборудования с динамическими нагрузками, расчет оснований на сейсмические воздействия.

После многочисленных исследований установлен факт, что при действии вибрации рыхлые отложения грунтов, особенно не обладающие сцеплением, могут давать значительные осадки, обусловленные уменьшением пористости грунтов в процессе их вибрирования [2]. Если построить зависимость между изменением коэффициента пористости и ускорением колебаний, можно получить виброкомпрессионную кривую. Причем исследования, выполненные для песков, показывают, что для разных значений частоты при увеличении виброускорения, экспериментальные точки изменения коэффициента пористости, хорошо укладываются на одну кривую.

Многочисленные исследования [2,3] показали, что параметром вибрации, в наибольшей степени коррелированным с риском повреждения конструкции здания, является пиковое значение скорости или ускорения. Данный параметр характеризует энергию сейсмических волн, воздействующих на конструкцию. Однако помимо этого существует еще ряд факторов, от которых зависит риск повреждения конструкции при данном пиковом значении скорости.

Многие из этих факторов в той или иной степени связаны с частотным составом вибрации. Поэтому в большинстве известных критериев оценки вибрации используют дополнительный показатель – частоту доминирующей составляющей спектра сигнала.

Специально поставленные опыты на одноосное и трехосное сжатие и сдвиг (в США профессорами А. Казагранде, Г. Сидом, Р. Олсоном и др.) показали, что динамическая прочность глинистых грунтов  $R_d$ , при времени нагружения 0,02 с, гораздо больше статической  $R_{ст}$ , причем для относительно слабых глин  $R_d \approx 2R_{ст}$  и для плотных  $R_d \approx 1,5R_{ст}$ . Сопротивление сдвигу глинистых грунтов при недренированных испытаниях также возрастает с увеличением скорости нагружения до 1,5...2,5 раза по сравнению с сопротивлением сдвигу при статической нагрузке.

Сравнивая прочность грунтов при кратковременных (но неразрушающих) импульсах с прочностью при длительных вибрациях, можно сделать вывод, что эти два вида динамических воздействия сказываются противоположно на механических свойствах грунтов – сопротивление грунтов при кратковременных импульсах значительно больше, чем сопротивление их при длительном вибрировании.

Были также проведены Г. Сидом опыты при действии на образцы грунтов повторных (до 100) кратковременных импульсов, имитирующих сейсмические воздействия, которые показали, что максимальная разрушающая нагрузка для грунтов была меньше статической и, кроме того, деформации грунтов возросли до 11%.

Исходя из того, что при строительстве сооружений на макропористых грунтах, обладающих свойством просадочности, устраивают искусственные основания с уплотнением грунтов различными способами, особый интерес представляет сопротивление грунтов сдвигу при вибрациях. При расчете несущей способности основания из нескальных грунтов необходимо учитывать возможность образования в грунте поверхности скольжения, при этом соотношение между нормальными и касательными напряжениями по всей поверхности скольжения должно соответствовать предельному состоянию грунта, обусловленному характеристиками прочности – расчетными значениями угла внутреннего трения и удельного сцепления.

Например, в работе [4] изучалось изменение прочностных свойств грунтов в зависимости от частоты колебаний до 10Гц, а в работе [5] изменение этих же показателей от амплитуды колебаний грунта.

Вибрации вызывают уменьшение трения между частицами грунтов и общее уменьшение их сопротивления сдвигу (что ухудшает несущую способность грунтов); импульсные воздействия средней величины – разрушение структуры грунтов и потерю их прочности.

Уменьшение сопротивления сдвигу при вибрациях в грунтах – основной фактор, влияющий на прочностные свойства грунтов.

Еще в 30-х годах проф. Г.И. Покровским было установлено, что коэффициент внутреннего трения грунтов зависит от энергии колебаний, уменьшаясь с ее увеличением, стремясь, однако, к некоторому пределу. Для грунтов же связных влияние вибрации на сопротивление сдвигу будет тем меньше, чем больше сцепление грунта. Согласно опытам В.А. Ершова и Си Дин И (1962) наблюдалось постепенное снижение сдвигу песчаных грунтов при вибрациях, которое можно описать эмпирически

$$\tau = \tau_0 e^{-x(a-a_0)},$$

где сопротивление сдвигу  $\tau$  при  $a \geq a_0$  (причем  $a$  – ускорение колебаний при данной возмущающей силе,  $a_0$  – начальное ускорение, при достижении которого начинают изменяться сопротивления сдвигу);  $\tau_0$  – сопротивление сдвигу при статических нагрузках;  $x$  – постоянный коэффициент, равный 0,003 с<sup>2</sup>/см для мелкозернистого и 0,0025 с<sup>2</sup>/см для среднезернистого песков.

Если рассматривать динамическую неустойчивость грунтов от различных источников динамических воздействий, что характерно для урбанизированных территорий, то согласно [1, 3], данные можно свести в таблицу 1.

Типичный диапазон параметров вибрации для некоторых источников возбуждения

Источник возбуждения	Диапазон частот, Гц	Диапазон перемещений, мкм	Диапазон скоростей, мм/с	Диапазон ускорений, м/с <sup>2</sup>	Длительность
Движение дорожного (рельсового) транспорта	1-80	1-200	0,2-160 (метрополитен до 300)	0,02-46 (метрополитен до 1800)	К/Д
Взрывы	1-300	100-2500	0,02-500	0,02-50	К
Забивка свай	1-100	10-50	0,2-50	0,02-2	К
Работа машин вне здания	1-300	10-1000	0,2-50	0,02-1	Д/К
Примечание: К – кратковременный процесс; Д – долговременный процесс					

При прогнозировании передаваемой через грунт вибрации от транспорта следует учитывать, что характеристики источника, пути распространения и объекта воздействия зависят от многих факторов, одни из которых более существенны, чем другие. Например, для источника это геометрия рельсового пути, характеристики подвижного состава и рельсов пути, состояние рельсового пути и колеса, основание рельсового пути, рабочие параметры (скорость движения рельсового транспорта и частота движения поездов); для пути распространения вибрации – тип грунта, расстояние до объекта воздействия, геологический профиль местности и форма земной поверхности, уровень грунтовых вод, динамические свойства грунта (модуль сдвига, коэффициент Пуассона, плотность, скорость волн сдвига и сжатия, коэффициент потерь и вид демпфирования (вязкое или гистерезисное)), неоднородности техногенной и естественной природы, средства ослабления передаваемой вибрации (например, наличие экранирующие стенки), сезонные особенности (промерзающий грунт, изменение свойств грунта и содержания влаги); для объекта воздействия – тип фундамента, взаимодействие сооружения с грунтом, материал сооружения, состояние сооружения, собственные частоты и коэффициент демпфирования конструкции.

В связи с этим данные для прогнозирования должны быть определены из опыта, литературных источников, экспертных оценок или по результатам измерений на месте.

Первые исследования длительной прочности грунтов были выполнены в 40-х годах М.Н. Гольдштейном применительно к мерзлым грунтам. Одним из первых экспериментальных исследований длительной прочности глинистых (не мерзлых) грунтов были проведены А. Казагранде и С. Уилсоном («Geotechnique», 1951, №2). Заклучались они в испытаниях на одноосное сжатие образцов различных глин и глинистых сланцев под различными постоянными нагрузками [6]. Эти испытания показали, что в результате ползучести образцы разрушались при нагрузках, составляющих от 80 до 40% (а в отдельных случаях и до 25%) от кратковременной.

Если испытывать образец материала, обладающего свойствами ползучести, быстро загружая его вплоть до разрушения, может быть определена так называемая условно-мгновенная прочность. Это понятие близко к понятию «временное сопротивление».

Если к идентичному образцу приложить нагрузку, несколько меньшую условно-мгновенной, то она тоже вызовет его разрушение, но уже не сразу, а через какое-то время. Так будет происходить и при других, еще меньших нагрузках до тех пор, пока при очередной нагрузке деформация не станет затухающей. Уменьшение величины разрушающего напряжения с увеличением времени до разрушения и есть проявление процесса снижения прочности.

График снижения прочности можно получить перестройкой кривых ползучести (рис.1). Так на основании испытаний образцов под нагрузками  $\tau_1 > \tau_2 \dots > \tau_i$  построено семейство

кривых незатухающей ползучести и определено время  $t_1 < t_2 \dots < t_i$ , за которое разрушался каждый из образцов. Можно построить по этим данным график, спроектировав на ось абсцисс значения времени  $t_1, t_2, \dots, t_i$  и отложив по оси ординат значения соответствующих напряжений  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i$ . В результате получим кривую, отображающую зависимость между напряжением и временем до разрушения. Эту кривую называют кривой длительной прочности.

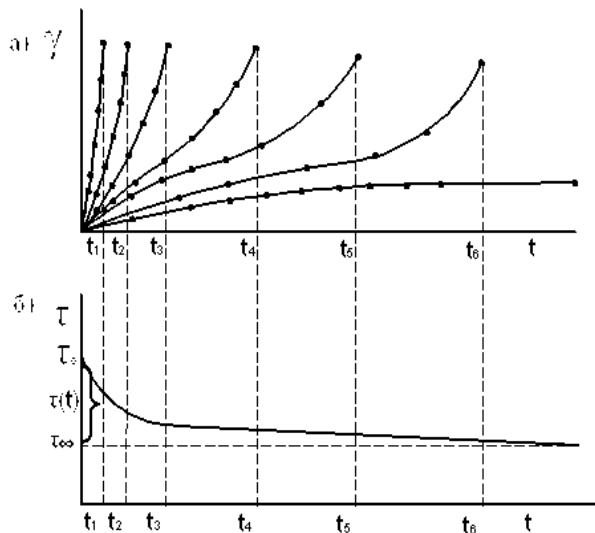


Рис.1. График снижения прочности грунта от времени: а – кривые ползучести грунта; б – кривая длительной прочности

Различают следующие значения прочности:

- условно-мгновенную  $\tau_0$  или  $R_0$ , т.е. наибольшую прочность, характеризующую сопротивление материала быстрому разрушению; она определяется начальной ( $t = 0$ ) ординатой кривой длительной прочности;

- длительную прочность  $\tau(t)$  или  $R(t)$ , определяемую напряжением, которое вызывает разрушение материала за данный промежуток времени; эту величину отображают текущей координатой кривой длительно прочности;

- предел длительной прочности  $\tau_\infty$  или  $R_\infty$ , соответствующий напряжению, до превышения которого деформация имеет затухающий характер, и разрушение не происходит при любом практически наблюдаемом времени воздействия нагрузки; при превышении же  $\tau_\infty$  возникает незатухающая ползучесть, приводящая к разрушению. Этот предел отображается асимптотой к кривой длительной прочности.

При испытаниях на ползучесть различных глин в условиях одноосного и трехосного сжатия, было установлено, что длительное разрушение образцов происходило при нагрузках, составляющих от 90 до 45% от условно-мгновенной, под которой имелось ввиду сопротивление разрушению при загрузении ступенями, с выдержкой каждой ступени в течение 5 с, при общей продолжительности испытания 50...60 с. Так, при испытании иллитовой глины под нагрузками, составляющими 90, 80, 70, 60% от мгновенной, разрушение наступило соответственно через 23 и 151 мин, 3,5 и 77 суток соответственно. При меньших значениях нагрузки деформации затухали, и разрушение грунта не наступало.

Аналогичные результаты получили другие исследователи при испытании на срез различных глинистых грунтов (Г.Л. Фисенко, 1964) и лессов (С.Е. Могилевская, 1960). Так под нагрузками, составляющими 70...80% от кратковременной прочности, разрушение образцов произошло через 20 и 90 дней, а отношение  $\tau_\infty/\tau_0$  составляло 0,5...0,85.

Для плотных глинистых грунтов прочность снижается в меньшей степени, чем у пластичных глин. По опытам Г.П. Степаненко с бурыми и пестрыми каолиново-монтмориллонитово-гидрослюдистыми глинами твердой и полутвердой консистенции ненарушенного сложения предельно-длительное сопротивление срезам и одноосному сжатию оказалось равным в среднем 0,9 от кратковременной прочности для бурой глины ( $W=20...30\%$ ) и 0,7 для пестрой глины ( $W=16...28\%$ ). В отдельных же опытах прочность снижалась до 50%.

В опытах А.М. Скимбицкого (1957) было получено, что предел длительной прочности на сдвиг составляет 70...75% от кратковременной прочности для полутвердых нижнемеловых глин, 60...70% – для тугопластичных кипельских глин и 90% – для твердой бейделлит-монтмориллонитовой третичной глины ( $W=34\%$  при  $W_p=34,5\%$ ).

В работе [7] представлены результаты исследований грунтов на длительную прочность при одноосном сжатии, используя длительные статические и вибрационные испытания. В полученных результатах интересным является вывод о том, что длительная прочность грунтов при статических и вибрационных испытаниях приблизительно одинаковы. Отношение скорости ползучести образца при вибрационных испытаниях к скорости ползучести при статических испытаниях можно обозначить коэффициентом вибрационного ускорения  $k_v$ . Он будет свой для каждой породы и не зависит от действующего напряжения на образец. Зависимость длительной прочности на сдвиг при статических и динамических испытаниях требует дальнейшего изучения.

**Выводы.** Вопрос влияния динамических нагрузок на прочностные и деформационные свойства грунтов рассматривался многими авторами, однако нельзя сказать, что он изучен полностью, решения получены только для определенных узких задач. В первую очередь, трудности возникают при моделировании адекватных условий при проведении экспериментов, отвечающих конкретным условиям работы грунта в натуре.

Результаты, которые были получены, позволяют спрогнозировать снижение прочностных свойств грунтов от кратковременных динамических воздействий с учетом разных характеристик (частоты, амплитуды или виброускорения), или отдельные зависимости снижения прочности грунта от длительных статических воздействий (ползучесть грунта). С интенсивным развитием современных программных комплексов, существует необходимость в получении обобщенных зависимостей, которые позволяют учитывать изменения прочностных и деформационных свойств грунтов при действии длительных динамических нагрузок без проведения дополнительных инженерно-геологических изысканий.

#### Список литературы

1. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 288 с.
2. Цытович Н.А. Механика грунтов: Учебник для строит. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1983. – 288 с.
3. Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 1: General guidance (ISO 14837-1:2005).
4. Бондарь И.С. Сдвиговые испытания связных грунтов при различных траекториях нагружения / Бондарь И.С. // Инженерно-строительный журнал. – 2012. - №7. – С.50 –57.
5. Абдукаримов А.М. Несущая способность земляного полотна, отсыпанного лессовыми грунтами, воспринимающими динамическую нагрузку: Автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.22.06. – Санкт-Петербург, 2011. – 23 с.
6. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: Учебное пособие для строит. вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 447 с.
7. Карташов Ю.М. Ускоренные методы определения реологических свойств горных пород. М.: Недра, 1973. – 112 с.