



ГЕЙДТ В. Д.
ГЕЙДТ Л. В.
ГЕЙДТ А. В.

Гейдт
Владимир
Давидович

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Проекти-
рование зданий и градо-
строительство»,
ФГБОУ ВО «Тюменский
индустриальный универ-
ситет»

e-mail: geidtdv@tyuiu.ru



Гейдт
Лариса
Викторовна

старший преподаватель
кафедры «Геотехники»,
ФГБОУ ВО «Тюменский
индустриальный
университет»

e-mail: general@tyuiu.ru



Гейдт
Андрей
Владимирович

магистрант 2 курса
ФГБОУ ВО «Тюменский
индустриальный
университет»

e-mail: geidtav@tyuiu.ru

Механизм влияния глубинной вибрации на изменение физического состояния грунта

Рассмотрен механизм влияния глубинной вибрации (продольных механических волн) на консолидацию водонасыщенного грунта, основанный на изменении физического состояния среды и учитывающий ее структуру. Влияние вибрации на процесс консолидации сводится к перераспределению соотношения между напряжением в скелете грунта и давлением в поровой воде на величину «вибрационного давления» так, что давление в поровой воде увеличивается, но не может превышать величину внешней статической нагрузки. В работе приведены результаты численных расчетов.

Ключевые слова: водонасыщенный грунт, консолидация, поровое давление, глубинное вибровоздействие, гармонические колебания, напряжения.

GEIDT V. D., GEIDT L. V., GEIDT A. V.

THE MECHANISM OF INFLUENCE OF DEEP VIBRATIONS TO CHANGE THE PHYSICAL CONDITION OF THE SOIL

The paper considers deep vibration (longitudinal mechanical waves) having an effect on water-saturated soil consolidation. The mechanism is based on the changed physical state of the medium and takes into account its structure. According to the proposed mechanism, the effect of vibration on soil consolidation is reduced to redistribution of the relationship between the stress in soil skeleton and the pressure of pore water versus the value of «vibration pressure» in such a way that the pore water pressure increases, but cannot exceed the value of the external static load. The paper presents the results of numerical calculations.

Keywords: water-saturated soil, consolidation, pore pressure, deep vibration, harmonic oscillations, stresses.

В настоящее время можно считать сформировавшимся направление исследований, посвященных влиянию динамических воздействий на консолидацию грунта [3–4]. Однако можно утверждать, что до последнего времени механизм влияния вибровоздействия на консолидацию грунта не выявлен [7, 8]. Влияние глубинного вибровоздействия на консолидацию грунта обусловлено:

- появлением дополнительного давления временной величины;
- изменением фильтрационной способности среды;
- изменением физического состояния среды [8].

В работах [7, 8] фактически доказано, что дополнительное избыточное давление в поровой воде, представленное как гармоническим

законом [7], так и в виде плоской волны [8], практически не оставляет в среде «остаточных» эффектов после выключения такого воздействия. В работе [6] показано, что коэффициент фильтрации не зависит от вибровоздействия. Поэтому и вторая из возможностей отпадает. Остается рассмотреть третий из механизмов глубинного вибровоздействия на процесс консолидации. Его анализу посвящена настоящая работа.

Пусть на рассматриваемый полностью водонасыщенный (газовая фаза отсутствует) грунт действует статическая внешняя нагрузка q , направленная вертикально вниз. В момент времени $t = 0$ в этой среде включен глубинный вибратор, представляющий собой вертикально установленный цилиндр радиуса r_0 , «стенки» которого создают в среде гармонически изменяющиеся возмущения с частотой ν . Ясно,

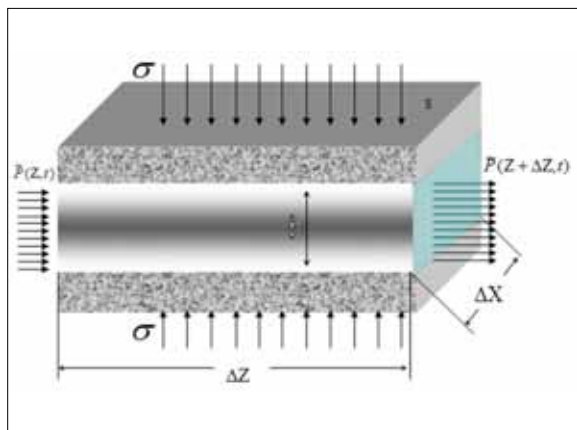


Иллюстрация 1. Иллюстрация воздействия механической плоской волны на слой воды, заключенной между выделенными частицами («чешуйками») грунта: σ — напряжения в скелете грунта; b — расстояние между частицами грунта; P — дополнительное давление волны в заданной точке в момент времени t ; S — площадь элемента грунта

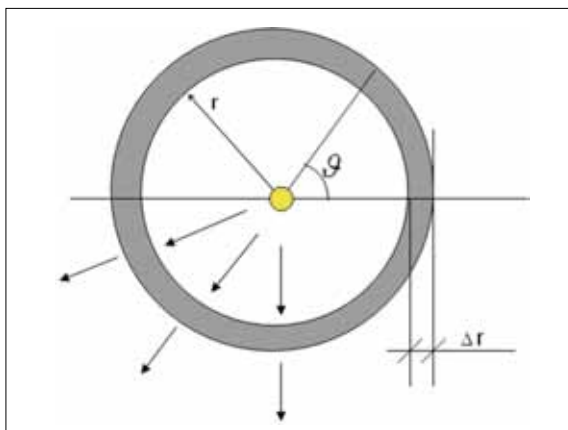


Иллюстрация 2. Воздействие цилиндрической волны на слой воды, заключенной между частицами грунта. В центре — источник цилиндрических волн. Здесь φ — угол сектора; r — расстояние от источника волны до рассматриваемого слоя; Δr — ширина элемента

что возмущения распространяются в среде в виде механических волн. Известно, что механические волны бывают (с точки зрения характера периодического движения частиц в среде) поперечными и продольными [5]. Поверхностные волны к теме отношения не имеют, так как мы ограничиваемся случаем глубинного вибратора, когда верхняя часть грунта пригружена достаточно большой внешней нагрузкой. Поверхностные волны возникают на границе раздела жидкости и газа. Что касается поперечных волн, то эти волны распространяются только в твердых телах [5].

Рассмотрим взаимодействие продольных волн (распространяющихся в горизонтальных направлениях) со средой. Учитывая геометрию виброствола, являющегося источником продольных волн в среде, будем рассматривать цилиндрические продольные волны. Для таких волн зависимость смещения частиц от положения покоя $u = u(r, t)$ описывается выражением [5]:

$$u = \frac{a}{\sqrt{r}} \sin(\omega t - kr) e^{-\alpha r}, \quad (1)$$

где a — величина, связанная с амплитудой колебания;

$u_0 = a / \sqrt{r}$;

ω — фазовая частота волны, $\omega = 2\pi\nu$,

где ν — частота колебаний;

k — волновое число $k = \omega / V$;

V — скорость распространения волны;

r — расстояние от оси симметрии до точки наблюдения;

t — время вибрации;

α — коэффициент затухания волн за счет поглощения.

При этом, дополнительное к давлению в воде, создаваемое такой волной, описывается формулой [6]:

$$\tilde{P} = \rho V \dot{u} = \rho V \omega u_0 \cos(\omega t - kr) e^{-\alpha r}, \quad (2)$$

где ρ — плотность воды; α — коэффициент затухания.

Интенсивность волны $I(r)$ (средняя за период мощность энергии, приходящаяся на единицу поперечной площади) с учетом затухания равна:

$$I(r) = \frac{1}{2} \rho V \frac{\omega^2 a^2}{r} e^{-2\alpha r}. \quad (3)$$

Теперь рассмотрим, как влияет такая волна на состояние воды в среде. Для этого начнем с элементарного акта взаимодействия. Пусть в скелете грунта установилось

напряжение σ . Положим, что каждая элементарная частица грунта окружена слоем воды, это означает, что если выделить какие-либо две элементарные частицы (через которые передается взаимодействие), то между ними будет слой воды толщиной b . Пара частиц участвует в передаче напряжения в скелете σ . Рассматриваемый слой связанной воды между частицами ведет себя как продолжение скелета. В горизонтальном направлении на этот элемент действуют силы, создаваемые волной, которым противодействуют силы трения.

Введем касательное напряжение τ , создаваемое волной в рассматриваемом слое воды. Ясно, что если τ не превышает касательного напряжения, создаваемого силами трения $\tau_{\text{тр}}$, тогда слой воды будет составлять единое целое с частицами грунта. Однако если это τ превысит $\tau_{\text{тр}}$, тогда этот слой воды перейдет в движение относительно скелета и взаимодействие между этими двумя частицами через воду разорвется, а саму воду, находящуюся в этом слое, уже можно рассматривать как свободную. Тогда две частицы повиснут в воде, и давление σ , действующее на верхнюю частицу, не будет передаваться на нижнюю частицу, а будет передано воде. Верхняя частица, воспринимающая вертикальное давление σ , будет взаимодействовать с водой, т.е. поровое давление воды увеличится на величину σ . С учетом пренебрежимо малой сжимаемости воды процесс разрушения структуры воды между частицами будет сопровождаться практически без изменения коэффициента пористости среды e .

Перейдем к количественной оценке τ и $\tau_{\text{тр}}$.

В макрообъеме максимальное значение $\tau_{\text{тр}}$ описывается формулой Кулона [3, 7]:

$$\tau_{\text{тр}} = \tau_{\text{кул}} = (\sigma + \sigma_c) \tan \varphi = \sigma \tan \varphi + C, \quad (4)$$

где σ — нагрузка в вертикальном направлении;

σ_c — структурная прочность;

C — связность;

φ — угол внутреннего трения.

Учитывая принцип суперпозиции, когда макросвойства определяются поведением частиц на микроуровне, можно считать, что $\tau_{\text{тр}}$ в нашем случае равно $2\tau_{\text{кул}}$. Множитель 2 используется, поскольку в трении участвуют как верхняя, так и нижняя частицы.

Оценим величину напряжения сдвига $\tau \equiv F/S$, создаваемой плоской волной в выделенном слое воды, находящейся между рассматриваемыми частицами (Иллюстрация 1).

В случае плоской волны:

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{\tilde{P}/b \Delta z \Delta x}{\Delta z \Delta x} = \tilde{P}/b, \quad (5)$$

где $\tilde{P}' = d\tilde{P}/dz$;

$\Delta z, \Delta x$ – горизонтальные размеры выделенного объема грунта;

b – среднее расстояние между частицами.

Здесь и ниже знак $\sim$ над буквой $\tilde{P}$ означает, что речь идет о дополнительном давлении волны, в отличие от избыточного порового давления воды P .

В случае цилиндрической волны (Иллюстрация 2) имеем:

$$\tau = \frac{F}{S} = b \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\tilde{P}(r, t)]. \quad (6)$$

Таким образом, условие достижения полного разжижения

$$\tau \geq \tau_{\text{кул}} = \sigma \text{tg}\phi, \quad (7)$$

где τ – это касательное напряжение, создаваемое волной в рассматриваемом слое воды, описывается формулами (5) или (6). В этом случае (полного разжижения) поровое давление P достигает своего максимального значения q .

Теперь рассмотрим случай, когда $\tau < \tau_{\text{кул}} = \sigma \text{tg}\phi$. Учитывая, что передача вышележащих слоев грунта ниже лежащим слоям напряжения σ формируется так, что некоторые частицы связаны сильно, а некоторые слабо, при воздействии на такую среду продольными волнами всегда найдется такая пара частиц, для которых воздействие волной будет достаточным для разрушения структурных связей. Это означает, что структурные связи будут нарушены не для всех частиц, а только для некоторых настолько, что σ уменьшится на величину $\Delta\sigma$, равную

$$\Delta\sigma = \frac{\tau}{2\text{tg}\phi}. \quad (8)$$

Другими словами, в неравенстве

$\tau < \tau_{\text{кул}} = \sigma \text{tg}\phi = (\tilde{\sigma} + \Delta\sigma) \text{tg}\phi$ член $\Delta\sigma \text{tg}\phi$ полагается равным τ . В этом случае под влиянием волны напряжение в скелете σ уменьшится на величину $\Delta\sigma$ и станет равным $\tilde{\sigma}$.

Напряжение в скелете без волны σ связано с остаточным напряжением в скелете при наличии волны $\tilde{\sigma}$ соотношением $\tilde{\sigma} = \sigma - \Delta\sigma$. Учитывая, что напряжение в скелете как при наличии волны $\tilde{\sigma}$, так и без наличия волны σ связано с давлением в поровой воде равенством $q = \sigma + P$, получим, что в рассматриваемом случае $\tau < \tau_{\text{кул}}$ давление в поровой воде при наличии волны $\tilde{P}$ не достигнет максимального значения q . Такое состояние среды, когда давление в поровой воде хотя и увеличивается на величину $\Delta\sigma$ (т.е. $\tilde{P} = P + \Delta\sigma$), но, тем не менее, не достигает своего максимально возможного значения q , будем называть частичным разжижением.

Итак, влияние волны на среду в условиях частичного разжижения ($\tau < \tau_{\text{кул}}$) сводится к тому, что давление в поровой воде P увеличится по сравнению с $\tilde{P}$ на величину $\Delta\sigma = \frac{\tau}{2\text{tg}\phi}$, где τ для плоской волны имеет оценку (5), а для цилиндрической волны имеет оценку (6).

Теперь получим оценочные формулы для τ применительно к цилиндрической волне, когда давление в поровой воде изменяется по закону

$$P(r, t) = \rho v \omega \frac{a}{\sqrt{r}} \cos(\omega t - kz) e^{-\alpha r}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{b}{r} \frac{\partial}{\partial r} [rP(r, t)] = \frac{b}{r} \rho V \omega a [\sqrt{r} e^{-\alpha r} \cos(\omega t - kz)]'_r = \\ &= b \rho V \omega a \frac{1}{r\sqrt{r}} e^{-\alpha r} \times \\ &\times \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha r \right) \cos(\omega t - bz) + kz \sin(\omega t - kz) \right] = \\ &= b \rho V \omega a \frac{1}{r\sqrt{r}} e^{-\alpha r} \Phi(\phi), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Phi(\phi)$ – величина, зависящая от фазы волны $\phi = \omega t - kr$. В случае, когда период колебаний $T = 1/\nu = 2\pi/\omega$ много меньше времени релаксации, можно заменить $\Phi(\phi)$ на максимальное значение $\Phi_m = \max \Phi(\phi)$ ($0 \leq t \leq 2\pi$), так как если в водяном слое между частицами произойдет преодоление сил трения при каком-то значении фазы (в какой-то момент времени), тогда в течение периода колебаний в этом слое воды не успеют восстановиться структурные связи. Можно показать, что в этом случае

$$\Phi_m = \frac{1}{2} \sqrt{(1 - 2\alpha)^2 + (2kz)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{1 - 4\alpha r + 4r^2(\alpha^2 + k^2)}. \quad (10)$$

Тогда максимальное значение $\tau_m(r) \equiv \max_{t_i \leq t \leq t_i + T} \tau(r, t)$ примет вид:

$$\tau_m = b \rho V \left(\frac{\omega}{r} \right) \frac{a}{\sqrt{r}} \frac{1}{2} \sqrt{1 - 4\alpha r + 4r^2(\alpha^2 + k^2)}. \quad (11)$$

В этих формулах α – коэффициент затухания.

Выявим связь значения межпорового зазора b с коэффициентом пористости e . Ясно, что эта связь полностью определяется структурой грунта. Поэтому величина b будет зависеть от принятых представлений о структуре грунта. Приняв модель грунта типа «сэндвич» («слоеный пирог»), состоящего из плотных чешуек, толщиной δ и расстоянием между ними величиной e , получим:

$$b = e\delta. \quad (12)$$

Если принять модель грунта типа «рыхлый сэндвич», у которого чешуйки имеют внутренний коэффициент пористости e_q , тогда

$$b = \delta \frac{e - e_q}{1 + e_q}. \quad (13)$$

Видно, что если в формуле (13) принять $e_q = 0$, тогда (13) переходит в (12). Таким образом, модель «чешуйчатый грунт» (12) является частным случаем модели «рыхлый чешуйчатый сэндвич» (13).

Для дальнейшего ограничимся моделью (13), хотя ясно, что для того, чтобы охватить различные типы грунтов, модели (13) недостаточно.

Заключение

В работе предложена модель взаимодействия продольных механических волн с водонасыщенным пригруженным грунтом. При этом выявлено, что:

- при выполнении условия (7) наступает состояние разжижения (когда напряжение в скелете уменьшается до нуля, т.е. $\tilde{\sigma} = 0$ и, как следствие, давление в поровой воде увеличивается до максимально возможной величины $P = q$);
- в случае, когда $\tau_m < \tau_{\text{кул}}$, напряжение в скелете уменьшается не до нуля, а до остаточного напряжения

$\bar{\sigma} = \sigma - \Delta\sigma$, где $\Delta\sigma$ можно вычислить по формуле (8) с учетом $\tau = \tau_m$, где τ_m для цилиндрических волн вычисляется по формуле (6), где параметр b в рамках рыхлой чешуйчатой модели грунта оценивается по формуле (13). В рассматриваемом случае $\tau_m < \tau_{кул}$ (частичное разжижение), давление в поровой воде увеличивается на величину $\Delta\sigma$ и не достигает предельного значения q .

Список использованной литературы

- 1 Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. — М.: Стройиздат, 1983. — 248 с.
- 2 Зарецкий Ю. К. Консолидация торфяного основания // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1970. № 6. — С. 12–15.
- 3 Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов : учебник для гидротехн. спец. вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1991. — 447 с.
- 4 Коновалов П. А. Строительство сооружений на заторфованных территориях : производ.-практ. изд. — М.: Стройиздат, 1995. — 343 с.
- 5 Кошкин Н. И. Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Шишкевич. — 8-е изд., перераб. — М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1980. — 280 с.
- 6 Кушнир С. Я. Консолидационные явления в торфяных грунтах при динамических воздействиях // Материалы II Балт. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. Строительство на торфах и деформации сооружений на сильносжимаемых грунтах. — Таллин, 1988. — С. 210–213.
- 7 Уфуков П. П., Гейдт В. Д., Гейдт Л. В. Влияние на консолидацию грунта дополнительной динамической нагрузки, изменяющейся во времени по гармоническому закону // Рукопись деп. в ВИНТИ, г. Москва, 2000.
- 8 Уфуков П. П., Гейдт В. Д., Уфукова О. Ю. Решение уравнения консолидации грунта с дополнительным динамическим воздействием в виде плоской волны // Рукопись деп. в ВИНТИ, г. Москва, 2000.

Spisok ispol'zovannoj literatury

- 1 Abelev M. Yu. Stroitel'stvo promyshlennyh i grazhdanskih sooruzhenij na slabyh vodonasyschennyh gruntah. — M.: Strojizdat, 1983. — 248 s.
- 2 Zareckij Yu. K. Konsolidaciya torfyanogo osnovaniya // Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov, 1970. № 6. — S. 12–15.
- 3 Ivanov P. L. Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. Mekhanika gruntov : uchebnik dlya gidrotekhn. spec. vuzov. — 2-e izd., pererab. i dop. — M.: Vyssh. shk., 1991. — 447 s.
- 4 Konovalev P. A. Stroitel'stvo sooruzhenij na zatorfovalnyh territoriyah : proizvod.-prakt. izd. — M.: Strojizdat, 1995. — 343 s.
- 5 Koshkin N. I. Spravochnik po ehlementarnoj fizike / N. I. Koshkin, M. G. Shishkevich. — 8-e izd., pererab. — M.: Nauka. Glav. red. fiz.-mat. lit., 1980. — 280 s.
- 6 Kushnir S. Ya. Konsolidacionnye yavleniya v torfyanyh gruntah pri dinamicheskikh vozdeystviyah // Materialy II Balt. konf. po mekhanike gruntov i fundamentostroeniyu. Stroitel'stvo na torfah i deformacii sooruzhenij na sil'noszhimaemyh gruntah. — Tallin, 1988. — S. 210–213.
- 7 Ufukov P. P., Gejdt V. D., Gejdt L. V. Vliyanie na konsolidaciyu grunta dopolnitel'noj dinamicheskoy nagruzki, izmenyayushchejsya vo vremeni

po garmonicheskomu zakonu // Rukopis' dep. v VINITI, g. Moskva, 2000.

- 8 Ufukov P. P., Gejdt V. D., Ufukova O. Yu. Reshenie uravneniya konsolidacii grunta s dopolnitel'nyim dinamicheskim vozdeystviem v vide ploskoj volny // Rukopis' dep. v VINITI, g. Moskva, 2000.

Gejdt V.

Cand. tech. Sci., the senior lecturer of faculty «design of buildings and urban planning», in Tyumen industrial University

Gejdt L.

the senior teacher of faculty «Geotechnics», Tyumen industrial University

Gejdt A.

undergraduate Tyumen industrial University