

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМЫВНЫХ И НАСЫПНЫХ ГРУНТОВ СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC FILL AND FILL -UP SOILS BY SEISMIC METHODS

Валерий Ефимович Сеськов, канд. техн. наук, доцент, заведующий отделом "Оснований и фундаментов" РУП "Институт БелНИИС", лауреат премии Совета Министров БССР и Республики Беларусь

Анна Александровна Окладникова, старший научный сотрудник отдела "Оснований и фундаментов" РУП "Институт БелНИИС"

В статье рассматриваются вопросы применения сейсмических методов для контроля уплотнения насыпных песчаных и намывных грунтов. Установлены корреляционные зависимости между скоростями упругих волн V_p и V_s и их затуханиями с объемным весом сухого грунта, коэффициентом уплотнения. По теоретическим зависимостям теории упругости приводятся примеры расчета упругих динамических и диссипативных характеристик грунтов. Применение сейсмических методов позволит контролировать большие объемы и площади уплотненных грунтов не в отдельных точках, а непрерывно по всей площади и глубине.

The article deals with the issues of applying seismic methods for control of fill-up sand and hydraulic fill soils compacting. Correlations between speeds of elastic waves V_p and V_s , their attenuations and volume weight of a dry ground, compacting index are established. According to theoretical dependences of the elasticity theory the examples of calculating the elastic dynamic and dissipative characteristics of soils are shown. Application of seismic methods allows to monitor great volumes and areas of compacted soils not in separate points but continuously on the whole area and depth.

ВВЕДЕНИЕ

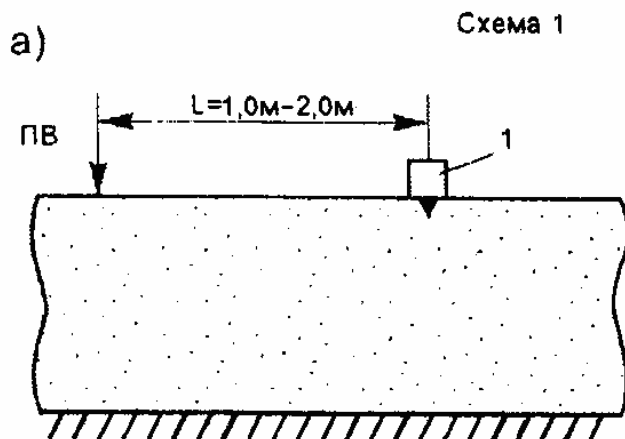
Обычно контроль за уплотнением насыпных и намывных грунтов осуществляют методами зондирования, отбором проб грунта, по которым определяется условное сопротивление статическому и динамическому зондированию, объемный вес сухого грунта, коэффициент уплотнения. При этом испытания проводят в отдельных точках, распространяя их характеристики по всей площади уплотнения. Здесь присутствует определенный недостаток, что между точками (10-20 м и более), грунт не исследован. Сейсмический метод позволит получить непрерывные характеристики по всей площади, а применение в комплексе с зондированием получить наиболее достоверные данные по уплотнению. Особенно это актуально для насыпных грунтовых оснований.

Физической основой сейсмических методов является зависимость скоростей упругих волн и их затухания от плотности грунта. В последние годы эти методы начинают широко применяться при геотехнических исследованиях грунтов в строительстве [1-3]. Однако для насыпных и намывных грунтов проведенных исследований недостаточно, поэтому целью этой работы является расширить применение методов сейсмоакустики для исследования насыпных и намывных грунтов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЯ

Сейсмические методы основаны на изучении распространения в земляном сооружении упругих волн, возбуждаемых искусственным путем с помощью одиночных ударных импульсов. По данным измерений определяют скорости распространения сейсмических-продольных V_{pc} и поперечных V_{sc} волн и их затухания, которые позволяют оценить степень уплотнения земляного сооружения.

При контроле качества уплотнения земляного сооружения сейсмическими методами следует принять схемы измерений, показанные на рисунке 1.

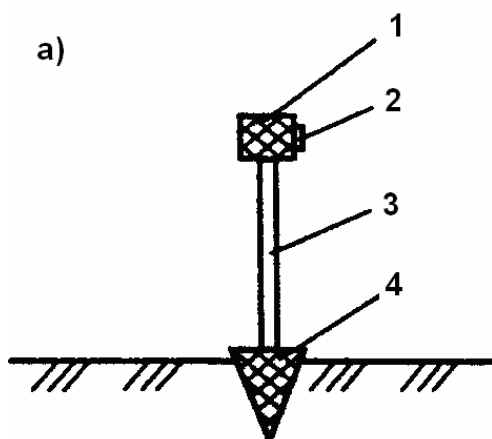


1 - сейсмоприемник (зонд); ПВ - пункт возбуждения; Д - шаг просвечивания (прозвучивания) по глубине; L - база просвечивания (прозвучивания)

Рисунок 1 - Схемы измерений сейсмическими методами при контроле плотности грунтов основания:

- а) - просвечивание (прозвучивание) в поверхностном слое;
- б) - просвечивание (прозвучивание) по глубине на параллельных лучах;
- в) - сейсмическое профилирование (сейсмозондирование);
- г) - просвечивание по глубине V_p и V_s волнами

Возбуждение упругих волн при сейсмических измерениях на поверхности земляного сооружения следует осуществлять тампером (молотом) массой 5-10 кг с инерционными контактами или конусным устройством (рисунок 2) [4].

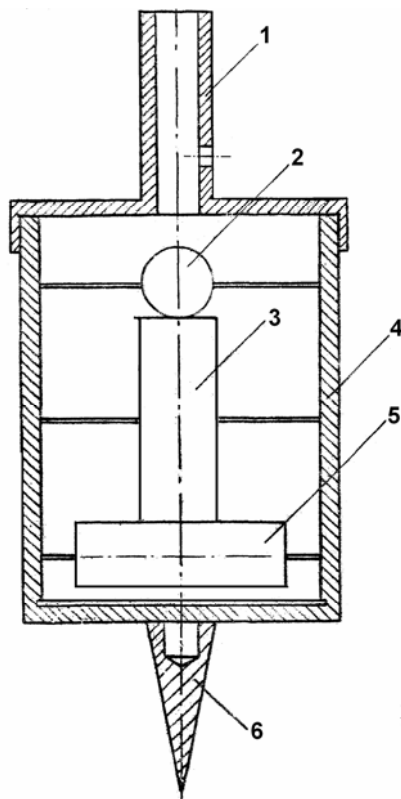


1 - металлическая наковальня; 2 - контакт; 3 - направляющая (диэлектрический стержень); 4 - конус с $\alpha = 60^\circ$; 5 - штанга; 6 - груз

Рисунок 2 - Устройство для возбуждения упругих волн:
а - на поверхности земляного сооружения;
б - по глубине земляного сооружения

При возбуждении колебаний по глубине земляного сооружения следует применять устройство, показанное на рисунке 1б. Возбуждение поперечных волн производят горизонтальным ударом тампера по стенке углубления (по схеме X и Y) или конусным устройством (рисунок 2б).

Прием колебаний осуществляют сейсмоприемниками или специальным зондом (рисунок 3), в котором размещено три сейсмоприёмника в трех взаимоперпендикулярных плоскостях. Зонд имеет переходник для соединения со штангами при погружении его в скважину. Прием колебаний продольных волн осуществляют сейсмоприемниками типа СВ-110 и СВ-120 или зондом (сейсмоприемник Z), поперечных волн - горизонтальными сейсмоприемниками СГ-110 и СГ-120 или зондом (сейсмоприемник X или Y).



1 – переходник; 2 – сейсмоприемник в положении X; 3 - сейсмоприемник в положении Z; 4 – корпус; 5 - сейсмоприемник в положении Y; 6 – наконечник.

Рисунок 3 – Схема сейсмозонда

Регистрацию упругих колебаний производим с помощью сейсморазведывательных станций типа "Лакколит X-M2" и "Дельта-Геон-02", позволяющих регистрировать временные интервалы длительностью от 0 до 1000 мкс и более, а также допускается использовать светолучевые осциллографы типа Н-044 и при сейсмическом профилировании применять сеймостанцию "Поиск-1-6/12-АСМ-ОВ".

Сейсмические измерения при определении плотности методом просвечивания выполняют следующим образом. Сейсмоприемник или зонд устанавливают на поверхность по схеме 1 или на заданную глубину по схеме 2 (см. рисунок 1). На расстоянии (L) производят удар одним из устройств (рисунок 2). В момент удара замыкается цепь и включается электронный прибор. В момент прихода продольной волны к сейсмоприемнику счет времени прекращается и на табло фиксируется время пробега волны расстояния (L). При осциллографировании колебаний на ленте осциллографа момент удара определяется по отклонению линии 1 от начального положения, приход волны к сейсмоприемнику - по первому вступлению (рисунок 4а).

При измерениях по глубине земляного сооружения (см. схемы 2, 4 на рисунке 1) зонд с сейсмоприемниками и устройство для возбуждения упругих волн надлежит устанавливать в заранее пробуренные скважины на одной и той же отметке глубин. Для обеспечения надежного контакта с грунтом "зонд имеет штырь, который вдавливается в грунт. Шаг просвечивания (Д) по глубине (см. рисунок 1б) принимают равным 1,0-2,0 м. При измерениях поперечных волн расстояние (L) от пункта возбуждения (ПВ) до первого приемника должно быть не менее 2 м, до второго – не менее 3 м, что позволяет измерить время прихода поперечных волн по первым вступлениям или фазам.

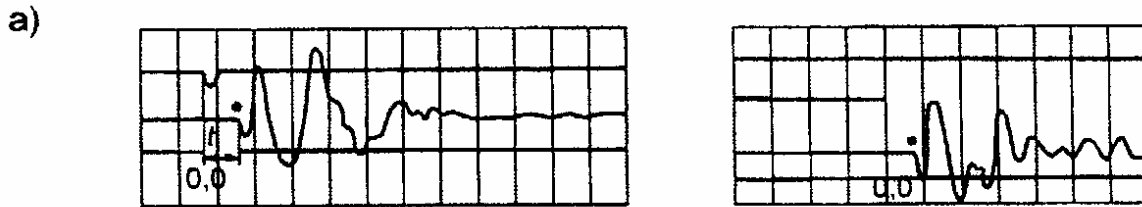
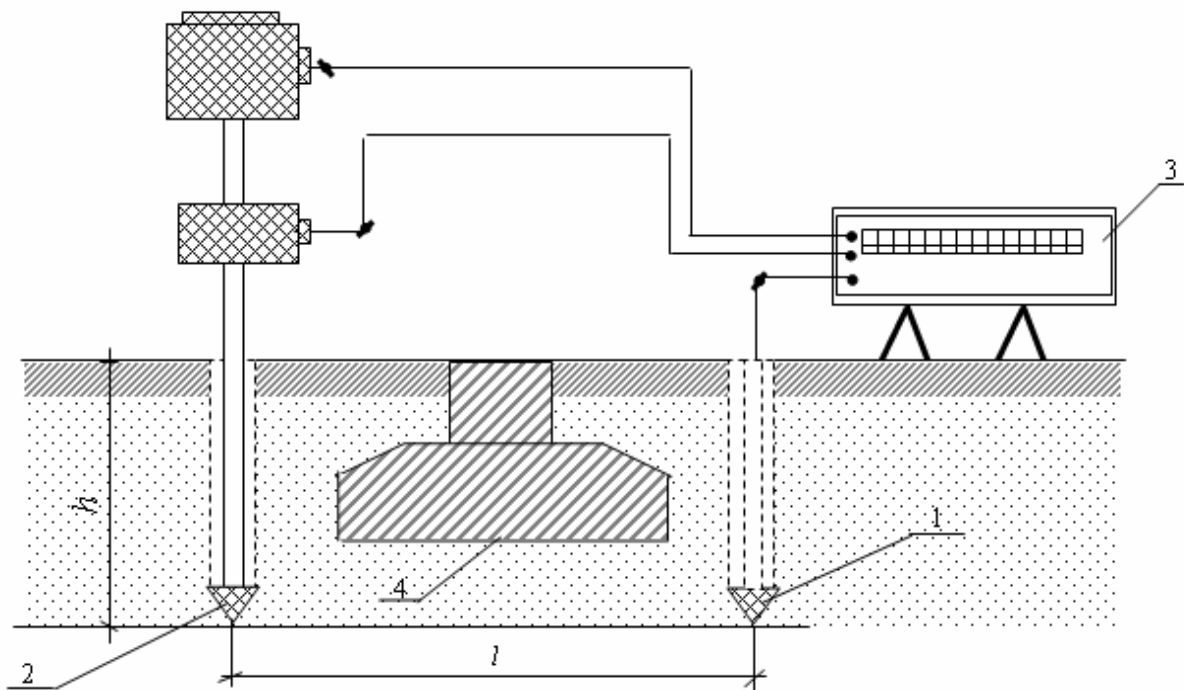


Рисунок 4 - Характерные осциллограммы

- а) - осциллограммы, полученные по схеме 1 (см. рисунок 1а) на осциллографе Н044;
 б) - осциллограммы, полученные по схеме 4 (см. рисунок 1г) - выделяются продольные и поперечные волны и показана инверсия фаз волн при перемене знака воздействия ($L=2$ и 3 м);
 в) - сейсмограмма, полученная по схеме 3 (см. рисунок 1в) по первым вступлениям момента прихода V_p волн;
 г) - годограф и колонка плотности земляного сооружения по глубине

При определении степени и однородности уплотнения по простиранию сейсмоприемники надлежит устанавливать на поверхности земляного сооружения в одну линию на одинаковом расстоянии друг от друга (по профилю) (см. рисунок 1в). Длина профилей 6, 12, 24 м при толще насыпей 2, 4, 6 м, расстояние между сейсмоприемниками соответственно 1,0 и 2,0 м. В пункте возбуждения производят удар по поверхности земляного сооружения падающим грузом или ударным устройством.

Для измерения скорости упругих волн под фундаментами используется схема, показанная на рисунке 5.



1 – сейсмоприемник; 2 - устройство для возбуждения упругих волн; 3 – регистратор; 4 - фундамент

Рисунок 5 – Схема исследования грунтов под фундаментами сейсмическим методом

По результатам сейсмических измерений определяют скорости распространения продольных V_{Pc} и поперечных V_{Sc} волн в грунте по формуле

$$V_{p,s} = \frac{L}{t}, \quad (1)$$

где L - расстояние от пункта возбуждения до сейсмоприемника (база просвечивания), м;

t - время пробега волной расстояния L , с.

Коэффициент затухания α , определяется согласно рисунка 4б, где измеряется амплитуда колебаний и по формуле

$$\alpha_{s,p} = \frac{1}{\Delta L} \cdot \ln \frac{A_1}{A_2}, \text{ м}^{-1} \quad (2)$$

где A_1 и A_2 – амплитуды колебаний, определяемые согласно рисунка 4б.

При инструментальном измерении скоростей продольных и поперечных волн по профилю используют методы, применяемые в сейсморазведке.

При использовании схемы 4 (см. рисунок 1) выделение поперечных волн производят по инверсии фаз при перемене знака удара на противоположный. На осциллографах сейсмического профилирования (см. рисунок 4в) отмечают моменты первых вступлений волн, определяют время прихода волны к каждому сейсмоприемнику и строят годограф, т.е. график зависимости времени прихода волны t от расстояния L (см. рисунок 4г). Если годограф прямолинейный, земляное сооружение однородно (равномерно) уплотнено. Криволинейный годограф свидетельствует о неравномерности плотности грунта по глубине, т.е. основание сложено различными грунтами.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

По результатам измеренных скоростей упругих волн определяются упругие характеристики грунтов по формулам теории упругости (таблицы 1) [5].

Таблица 1

Наименование величины	Индекс	Выражение через скорости упругих волн, V_p, V_s	Выражение через модуль упругости E и коэф. Пуассона, μ	Выражение через константы Ляме, G и λ
Скорость объемных продольных волн	$V_p, \text{ м/с}$	V_p	$\sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$	$\sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$
Скорость объемных поперечных волн	$V_s, \text{ м/с}$	V_s	$\sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}}$	$\sqrt{\frac{G}{\rho}}$
Модуль упругости Юнга	$E, \text{ кН/м}^2$	$\rho \frac{V_s^2(3V_p^2 - 4V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	E	$\frac{G(3\lambda - 2G)}{(1+G)}$
Коэффициент Пуассона	μ	$\rho \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	μ	$\frac{\lambda}{2(\lambda + G)}$
Модуль сдвига (вторая константа Ляме)	$G, \text{ кН/м}^2$	ρV_s^2	$\frac{E}{2(1+\mu)}$	G
Первая константа Ляме	λ	$\rho(V_p^2 - 2V_s^2)$	$\frac{E}{3(1-2\mu)}$	λ
Модуль всестороннего сжатия	K	$\rho \left(V_p^2 - \frac{h}{3} V_s^2 \right)$	$\frac{E}{3(1-2\mu)}$	$\lambda + \frac{2}{3} G$
Отношение скоростей упругих волн	$V_v = \frac{V_s}{V_p}$	$\frac{V_p}{V_s}$	$\sqrt{\frac{2(1-\mu)}{(1-2\mu)}}$	$\sqrt{\frac{\lambda + 2G}{G}}$
Плотность грунта	$\rho, \text{ г/см}^3, \text{ т/м}^3$	$\rho = \frac{\gamma}{g}$, γ - удельный вес, кН/м^2 ; g - ускорение, м/с^2 .		

ПЕСКИ НАСЫПНЫЕ

Для установления взаимосвязи между сейсмическими и физико-механическими характеристиками проведены экспериментальные исследования для некоторых песчаных насыпных грунтов, т.е. мелких, средних и крупных песков территории Беларуси (разного генезиса).

Результаты исследований выявили, что скорость прямой продольной волны в песчаных насыпях (в интервале влажности 2-12%) в основном зависит от плотности песков и колеблется от 80 до 450 м/с при ρ_d от 1,45 до 1,85 г/см³. Изменение влажности в этих пределах (при одной и той же плотности) на скорости упругих волн практически не влияет. Коэффициент корреляции $r=0,86$, число измеряемых пар $n=248$. Погрешность измерений плотности по V_p по сравнению со стандартными испытаниями (режущего пальца) не превышает 0,02-0,03 г/см³, что для практических целей вполне допустимо.

Для определения ρ_d также использовали поперечные волны V_s , скорость которых колеблется от 65 до 220 м/с. Однако надо отметить, что на близких расстояниях (1-3 м) вступление поперечных волн выделить затруднительно. Поэтому часто скорости поперечных волн определяем по фазе. Коэффициент корреляции $r=0,84$, число измеряемых пар $n=58$. Погрешность измерений по сравнению со стандартными методами обычно не превышает 0,03 г/см³. Корреляционные зависимости результаты корреляции приведены в таблице 2.

Таблица 2

Метод измерений	Вид грунтов	Корреляционное уравнение	Область применения		
			W, %	K_y	ρ_d , г/см ³
Сейсмический	Песок мелкий, средней крупности, крупный, гравелистый	$\rho_d=0,00077 V_{Pc}+1,50$	2-10	0,90-1,00	1,55-1,85
		$\rho_d=0,002 V_{Sc}+1,44$	2-10	0,90-1,00	1,55-1,85

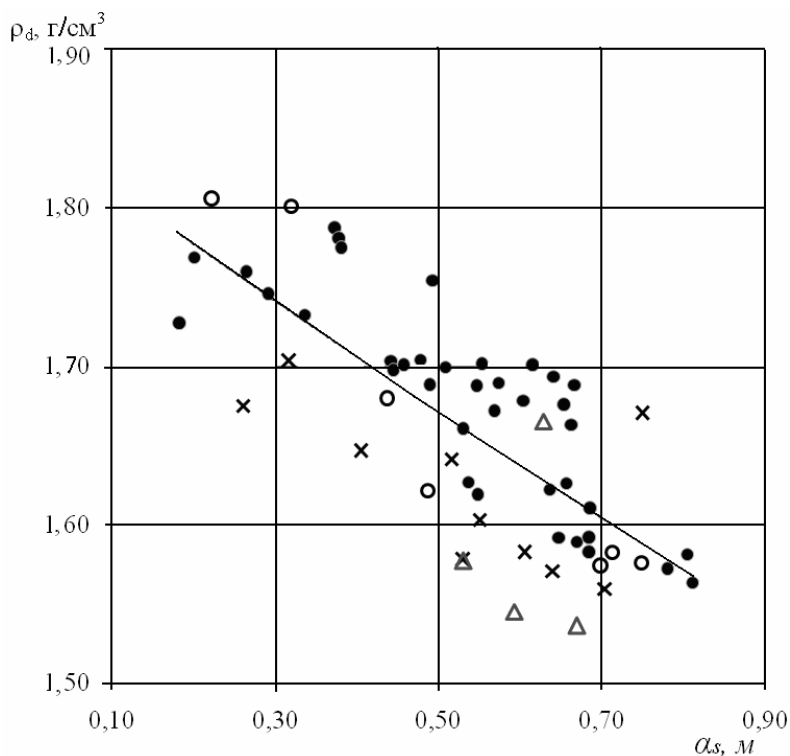
Как вспомогательный способ в определении плотности ρ_d насыпного песчаного основания использовали результаты испытаний затухания поперечных волн. Коэффициент затухания α_s волн с ростом объемного веса сухого грунта уменьшается и изменяется в пределах 0,15-0,8 м⁻¹, соответственно в уплотненных ($K_y \approx 1,0$) и неуплотненных песках ($K_y < 0,92$) (рисунок 6).

НАМЫВНЫЕ ПЕСКИ

Самые низкие значения скоростей распространения продольных и поперечных волн наблюдаются у свеженамытых песков (<0,5 года), которые практически не обладают структурной связностью или у которых эта связность слабая. У таких грунтов скорость распространения продольных волн V_p , как правило, не превышает 150 м/с. С течением времени намывные грунты уплотняются, в них происходят рост и упрочнение структурных связей, в результате значительно возрастают и скорости. Это подтверждают исследования, проведенные на намывных основаниях г.г. Гомеля, Могилева и Бреста (таблица 3). Явление возрастания скорости упругих волн в подобных грунтах объясняется их уплотнением и упрочнением во времени (создаются кремнеземистые связи между песчаными частицами и глинистыми прослоями, которые зависят от технологии намыва), что подтвердилось результатами испытаний грунтов статической нагрузкой в вертикальной и горизонтальной плоскости и зондированием [6].

Таблица 3 – Скорости распространения в намывных песках продольных и поперечных волн

Давность намыва, t	V_p , м/с	V_s , м/с	E , МПа
2 месяца	250	140	10-12
5 лет	320	190	25-28
10 лет	450	260	30-35
25 лет	700	430	



- - песок мелкий;
- × - песок средний;
- - песок крупный и гравелистый.

Рисунок 6 – Зависимость между коэффициентом затухания поперечной волны α_s и объемной массой сухого грунта ρ_d .

На основании результатов испытаний получены следующие корреляционные зависимости:

$$E = 34,66 \cdot \ln(V_s) - 158,63, \text{ МПа}, R^2 = 0,90 \quad (3)$$

$$E = 35,40 \cdot \ln(V_p) - 182,63, \text{ МПа}, R^2 = 0,85 \quad (4)$$

где E - модуль деформации;

V_s - скорость поперечной волны, м/с;

V_p - скорость продольной волны, м/с;

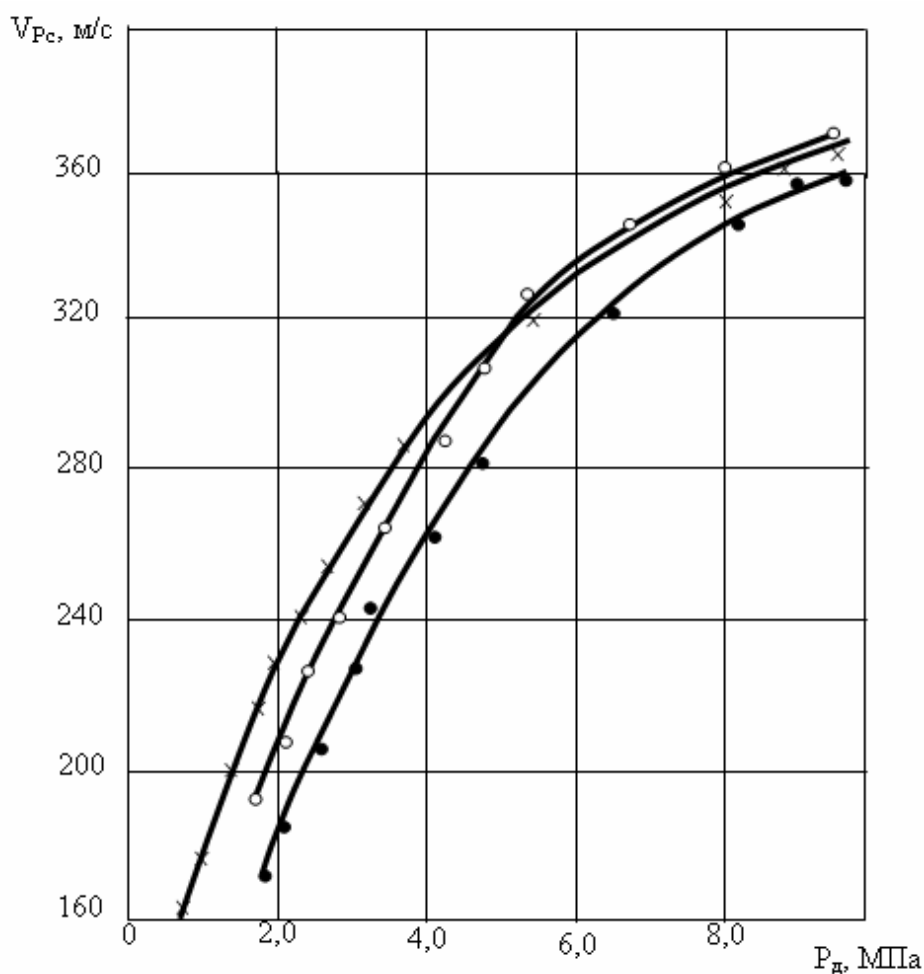
Отношение модуля деформации горизонтальной плоскости к вертикальной колеблется в пределах 1,2-1,5 раза.

Теоретический расчет скоростей упругих волн по модели многокомпонентной упругой среды [1,3,7], дает больше погрешности, чем по корреляционным зависимостям в связи со сложностью учесть соотношение отдельных компонентов среды и их взаимосвязи на молекулярном уровне, поэтому в данной работе дается предпочтение корреляционным зависимостям.

Установление корреляционных зависимостей между механическими характеристиками (условное динамическое сопротивление P_d) и геофизическими (скорости упругих сейсмических волн V_p и V_s) позволит перейти от одного метода испытаний к любому другому и определить целый ряд других важных характеристик необходимых при проектировании и оценке качества возведения основания [8,9]. Связь между механическими P_d и геофизическими показателями V_p находим для одного и того же значения коэффициента уплотнения для каждого вида грунта в пределах $K_y=0,9-1,0$.

На рисунке 7 приведены полученные зависимости для песчаных насыпных грунтов Беларуси. При переходе к характеристикам плотности ρ_d через механические и геофизические характеристики, погрешность измерения K_y не превышает 0,02.

Также установлена взаимосвязь между модулем упругости и коэффициентом уплотнения (рисунок 8). Модуль упругости определили по скорости упругих волн и корректировали по штамповым испытаниям.



- - песок мелкий;
- × - песок средней крупности;
- - песок крупный.

Рисунок 7 – Зависимость между скоростью продольной волны V_{Pc} и условным динамическим сопротивлением P_d

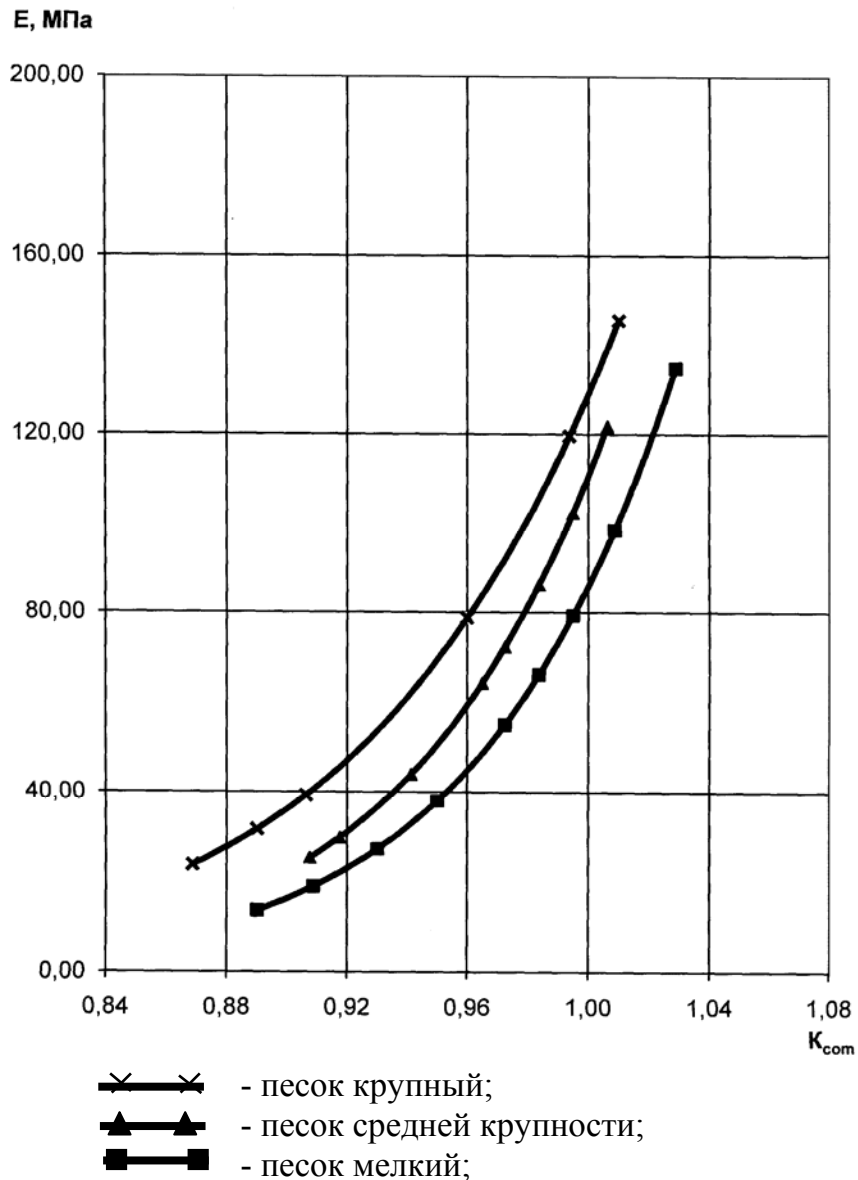


Рисунок 8 - Зависимость модуля упругости E от коэффициента уплотнения K_{com} песчаных грунтов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сейсмические методы контроля уплотнения земляных сооружений и оснований фундаментов позволяет получить непрерывные характеристики по всей площади, а не дискретные в отдельных точках по стандартной методике.

2. Получены корреляционные зависимости между сейсмическими характеристиками скоростей упругих волн V_P и V_S и их затуханием с физико-механическими характеристиками насыпных и намывных грунтов.

3. Погрешности определения плотности грунтов (объемного веса сухого грунта, коэффициента уплотнения K_y не превышают допустимых величин, т.е. $\rho_d \leq 0,03 \text{ г/см}^3$, $K_y \leq 0,02$.

4. Применение комплексных исследований, динамическим зондированием, лабораторными испытаниями и сейсмическими методами позволяют получить наиболее достоверные данные о состоянии земляного полотна и основания фундаментов, что гарантирует надежную эксплуатацию зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарев В.Н. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. –М., 1974 г.
2. Агеев В.Н. Разработка методики определения физико-механических свойств песчаных грунтов в естественном залегании для строительных целей с помощью сейсмической разведки. /канд. Диссертация. Свердловск, 1974 г.
3. Сеськов В.Е. Методы сейсмоакустики для исследования физико-механических характеристик биогенных грунтов. –М., Строительная наука и техника, - 2006, -№4, - С. 73-80.
4. Сеськов В.Е., Яромко В.Н. Ударное устройство источника возбуждения упругих волн. А.с. №616602 от 15.02.77. Бюллетень №27 от 25.07.78 г.
5. Красников Н.Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. –М., Стройиздат, 1970. -240 с.
6. ТКП 45-5.01-76-2007 (02250) Основания и фундаменты зданий и сооружений на пойменно-намывных территориях. Правила проектирования и устройства.
7. Назаров Г.Н. Новые данные о скоростях распространения упругих волн в грунтовых массивах. / В кн: инженерно-строительные изыскания. –М., 1972, №2 (27). – С.10-12.
8. ТКП 45-5.01-17-2006 (02250) Прочностные и деформационные характеристики грунтов по данным динамического зондирования. Правила определения.
9. СТБ 1241-2000. Зонд забивной. Технические условия.