



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ НАСЫПНЫХ ГРУНТОВ

АННОТАЦИЯ. В статье предложена методика оперативной оценки качества уплотнения замещённого грунта с использованием неразрушающих методов сейсмотомографии. Методика апробирована в условиях строительства площадки длительного хранения утилизируемых реакторов атомных подводных лодок в Сайда-Губе на побережье Баренцева моря.

При строительстве гидротехнических сооружений, оснований конструкций сооружений особого назначения в условиях Заполярья с использованием технологии засыпки и замещения грунтов контроль качества их уплотнения является неотъемлемой частью всего технологического процесса строительства. Возможности внутреннего промерзания грунта, образование линз льда в зимнее время и их оттаивание в летнее, влияние грунтовых вод и морских приливов - всё это делает задачу локализации зон разуплотнения внутри уплотняемого слоя в процессе строительства достаточно актуальной.

Принятые в настоящее время точечные прямые методы оценки плотностных характеристик грунтов способами отбора проб, шурфов не дают желаемого результата о распределении плотностных характеристик в толще грунтов и по всей территории засыпки. При мощности слоя засыпки более 2 - 3 м эффективно использование оперативных методов поверхностной сейсморазведки с томографической обработкой данных, основанных на взаимосвязи скоростей продольных сейсмических волн и уплотнений грунта [1]. Однако здесь следует говорить об относительных оценках уплотнений в режиме мониторинга, обеспечивающего неразрушающий контроль значительных площадей и глубин обследования. В такой постановке методически необходимо решить две основные задачи: установление взаимосвязей скоростей продольных сейсмических волн и уплотнений грунта и влияния влагонасыщения грунтов на результаты оценки качества их уплотнения.

Согласно рекомендациям СНиП 3.02.01-87 [6], для контроля качества послойной укладки горной массы,

ABSTRACT. The article deals with methods of the rapid estimation of the substituted soil compaction using non-disturbing seismic surveying methods. The methods have been tested under the conditions of long-term storage facility construction of decommissioned compartments of nuclear submarines in Saida Bay on the Barents Sea shore.

представляющей собой обычно смеси в различных пропорциях обломочного скального грунта и щебня, следует применять коэффициент (степень) уплотнения m - отношение плотности сухого грунта (ρ_{ic}) горной массы к максимальной плотности сухого грунта $\rho_{c\max}$, которая может быть достигнута при уплотнении. Тогда, чтобы избежать недоуплотнения, схема контроля должна удовлетворять условию:

$$m \geq m_{\text{проектн.}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{проектн.}}$ - коэффициент уплотнения, устанавливаемый проектом в зависимости от класса капитальности, конструктивных особенностей объекта и сейсмичности района.

К настоящему моменту накоплено много данных о соотношении между плотностью грунта ρ_i и скоростями продольных волн V_{pi} . С достаточной степенью достоверности эти зависимости описываются степенным выражением вида:

$$\rho_i = aV_{pi}^\beta, \quad (2)$$

где a, β - эмпирические коэффициенты.

Тогда с учётом выражения (2) получим:

$$m = \left(\frac{V_{pi}}{V_{p\max}} \right)^\beta, \quad (3)$$

где $V_{pi}, V_{p\max}$ - текущее и максимальное значения скоростей продольных сейсмических волн в замещаемом

слое грунта, соответствующие текущей и максимально достижимой плотностям грунта при уплотнении.

Таким образом, задача сводится к определению допустимого диапазона скоростей ($V_{pi} \dots V_{p \max}$), удовлетворяющего проектно заданному уплотнению m . Методика оценки $V_{p \max}$ сводится к следующему. Вначале оцениваются максимально достижимые плотности грунта $\rho_{c \max}$ и допустимый интервал уплотнения ($\rho_{c \max} \dots m \cdot \rho_{c \max}$). Для этого можно использовать целый ряд известных методик [2, 4]. Установленный допустимый размах оценочных плотностных характеристик грунта позволяет определить и соответствующий ему размах допустимых характеристик непосредственно измеряемых параметров грунтов на площадке, т. е. скоростей упругих сейсмических волн. Для этого используем известные зависимости пористости грунта n_i (трещинной пустотности) от скорости сейсмической волны [5]:

$$n_i = (V_{p0} / V_{pi} - 1) / (V_{p0} / V_{p \text{зап}} - 1), \quad (4)$$

где V_{p0} - скорость продольной волны в скальной отдельности грунта (по данным лабораторных определений можно принять $V_{p0} = 5,67$ км/с); V_{pi} - скорость продольной волны в грунте, измеренная в реальных натуральных условиях; $V_{p \text{зап}}$ - скорость продольной волны в заполнителе пор грунта (для воздуха $V_{p \text{зап}} = 0,30$ км/с).

Для сухого грунта (принимается, что заполнителем порового пространства является воздух) графически эта зависимость представлена на рис. 1. По графику легко оценивается искомый диапазон разрешённых скоростей в засыпке грунта, соответствующий заданным показателям пористости.

Во всех приведённых рассуждениях речь идёт о показателях сухого грунта, поэтому следующим методическим шагом является оценка фактической влагонасыщенности обследуемого грунта. Действительно, водонасыщение грунтов может, с одной стороны, образовывать зоны разуплотнения и вымывания грунтов, с другой - существенно увеличивать скорость продольной волны при измерениях, и тогда оценка степени уплотнения по этому показателю станет неадекватной. Для оценки

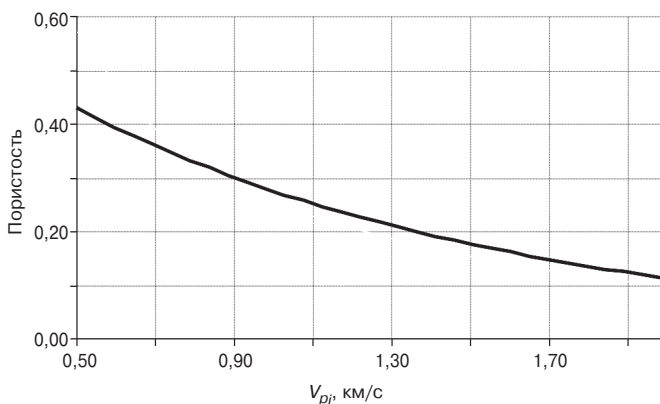


Рис. 1. Взаимосвязь пористости грунта и скорости продольной волны

фактического состояния грунтов используется относительный показатель отношения скоростей сейсмических волн V_s/V_p , где V_p, V_s - скорости продольной и поперечной сейсмических волн. Отношение скоростей продольной и поперечной сейсмических волн, как известно [5], позволяет оценивать коэффициент Пуассона среды (коэффициент поперечной деформации) - характеристику состояния и деформируемости среды. Он определяется согласно выражению:

$$\nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2), \quad (5)$$

где ν - коэффициент Пуассона среды; V_p, V_s - скорости продольной и поперечной волн соответственно.

Диапазон изменения коэффициента Пуассона от 0 до 0,5 охватывает весь возможный спектр состояний среды - от упругохрупкого, характерного для коренных скальных горных пород ($\nu = 0 - 0,25$), до пористо-пластичного состояния с характерными значениями коэффициента Пуассона 0,30 - 0,35 (щебень, пески, глины и пр.). Для жидких сред ν приближается к 0,5. Таким образом, влагонасыщение грунтов способствует росту коэффициента Пуассона среды. Согласно данным РСН 66-87 [3], для смесей обломочных грунтов и щебня разница V_s/V_p в сухих и водонасыщенных грунтах может достигать 6 - 7 раз, что обеспечивает надёжность оценки водонасыщения по данным натуральных измерений.

Реализация методики оценки уплотнения грунтов засыпки с использованием метода сейсмической томографии осуществлялась при сопровождении строительства площадки длительного хранения реакторных отсеков атомных подводных лодок в Сайда-Губе (ПДХ АПЛ) на побережье Баренцева моря. На территории 400×200 м моренный грунт был замещён на скально-щебенистую массу крупностью не более 800 - 1500 мм и щебень 40 - 70 мм. Уплотнение грунта осуществлялось виброкатками. Мощность замещённого грунта на отдельных участках достигала 11 - 13 м. Заданная степень уплотнения грунта m составляет 0,95 - 1,0. Для оценки $\rho_{c \max}$ использована методика [2].

Для условий скально-щебенистой отсыпки в работе предложено использовать комплексный квалификационный показатель. Этот показатель разработан на основе большого экспериментального материала, полученного при строительстве различных каменно-земляных плотин при уплотнении горной массы виброкатками. Он представляет собой совокупность известных характеристик грунта, объединённых в один модуль: пористость грунта n , оценивающая соотношение между пустотами в горной массе и её минеральной частью; показатель сегрегации грунта $k = f(K_{60,10})$, характеризующий неравномерность раскладки частиц в объёме грунта; плотность частиц каменного материала ρ_0 , отражающая среднюю плотность минералов породы. Как показывают результаты исследований [2], связь этого комплексного показателя, имеющего вид: $[(1 - n_{i \min})k\rho_0]$, и максимально возможной плотности сухого грунта уплотнённой горной массы $\rho_{c \max}$ аппроксимируется уравнением вида (коэффициент корреляции $R = 0,99$):

$$\rho_{c\max} = 1,794 + 0,125 \text{Ln}[(1 - n_{i\min})k\rho_0], \quad (6)$$

где $(1 - n_{i\min})$ - объём скелета в единице объёма грунта; $n_{i\min} = (0,45 - 0,1 \cdot \lg K_{60,10})$ - пористость грунта; $k = (1 + 0,05 \cdot K_{60,10})$ - коэффициент неравномерности раскладки частиц грунта в уложенном слое.

Принимая для скально-щебенистых грунтов при отсыпке площадки в Сайда-Губе средневзвешенное значение коэффициента $K_{60,10} = 24,4$, определяем параметры квалификационного показателя: $n_{i\min} = (0,45 - 0,1 \cdot \lg 24,4) = 0,31$; $k = 2,22$; для скальных отделистостей грунта принимаем $\rho_0 = 2,67 \text{ т/м}^3$. Квалификационный показатель тогда составит 3,91. Из выражения (6) оцениваем $\rho_{c\max} = 1,97 \text{ т/м}^3$. По условию проекта коэффициент уплотнения m должен составлять 0,95 - 1,0. Тогда можно оценить минимально допустимое значение плотности грунта: $\rho_{c\min} = 0,95 \cdot 1,97 = 1,87 \text{ т/м}^3$.

Для грунтов с пористостью $n_{i\min} = 0,31$ с $\rho_{c\max} = 1,97 \text{ т/м}^3$ (случай максимального уплотнения) по рис. 1 оцениваем ожидаемые скорости упругих волн для уплотнённых грунтов в диапазоне $V_{pi\max}$ - (0,75 - 0,90) км/с. Минимально допустимые скорости, удовлетворяющие требованиям по уплотнению, можно оценить следующим образом. По определению пористость однородного, однозернистого грунта определяется согласно выражению:

$$n = (1 - \rho_{ci}/\rho_0) \cdot 100\%, \quad (7)$$

где ρ_0 - плотность скальной отделистости составляющей грунт засыпки.

Тогда для выявленного выше допустимого интервала плотностей скелета грунта ρ_{ci} - (1,87 ... 1,97) т/м³ и $\rho_0 = 2,67 \text{ т/м}^3$ оцениваем интервал предельно допустимых значений пористости для однородного грунта $n_{i\text{однородн}}$. Он составляет 26 ... 30%. Как видно из полученных значений, разница минимально допустимых пористостей грунта $n_{i\min}$, определённых по выражениям (6) и (7), обусловлена неоднородностью реального грунта (для реального грунта пористость выше).

Эта разница будет определять поправочный коэффициент λ_i на неоднородность грунта (неравномерность укладки, разница грансостава, формы и пр.): $\lambda_i = n_i/n_{i\text{однородн}} = 0,31/0,26 = 1,19$. Вводя полученную поправку, уточняем наибольшую допустимую пористость для реального грунта: $n_{i\max} = 0,30 \cdot 1,19 = 0,36$. Тогда (см. рис. 1) нижний допустимый интервал ожидаемых скоростей $V_{pi\min}$ составит 0,60 ... 0,70 км/с. Исходя из приведённых рассуждений, при натурных измерениях на площадке допустимый интервал изменения скоростей упругих волн в грунте следует ожидать в диапазоне 0,65 ... 0,85 км/с.

Для оценки влагонасыщения грунтов воспользуемся данными РСН 66-87 [3] для смесей обломочных грунтов и щебня, причём считаем грунт водонасыщенным при $V_s/V_p < 0,30$.

Сейсмоизмерения проводились с использованием 24-канальной цифровой сейсмостанции "Elliss" (сертификат соответствия рег. № ССПП 01.1.1.-125). При выполнении сейсмического профилирования установ-

лены следующие параметры регистрации: окно частотного диапазона аппаратуры - до 500 Гц, период дискретизации - 0,5 мс, длина записи - до 1,0 с, шаг расстановки сейсмоприёмников - 2,0 м, длина одной расстановки сейсмоприёмников (24 шт.) - 46,0 м. Расчёты скоростных кинематических разрезов при моделировании и при обработке данных натурных наблюдений выполнены с использованием программного томографического пакета "ХТомо" (version 1.0, разработка компании X-Geo, г. С-Петербург, лицензия А-545). В качестве начальной скоростной модели среды выбрана двухслойная среда "грунт - коренная порода" с параметрами скоростей $V_{p0} = 0,6 \dots 0,85 \text{ км/с}$ - для однородных грунтов и $V_{p0} = 1,4 \dots 4,0 \text{ км/с}$ - для коренных пород.

На рис. 2 приведены сейсмотомографические разрезы скоростей продольной (а) и поперечной (б) сейсмических волн по одному из профилей на площадке. Мощности насыпных грунтов варьирует от 4,5 до 8 м. Зона низких скоростей продольных волн в поверхностном слое грунта, не удовлетворяющая условию достаточного уплотнения по скорости продольной волны $V_p < 0,65 \text{ км/с}$ (белая палитра рисунка), фиксируется в самой приповерхностной части и незначительна. Внутри слоя засыпки на отметках +1 ... -2 м фиксируются незначительные локальные зоны (менее 1% распространённости на участке) с

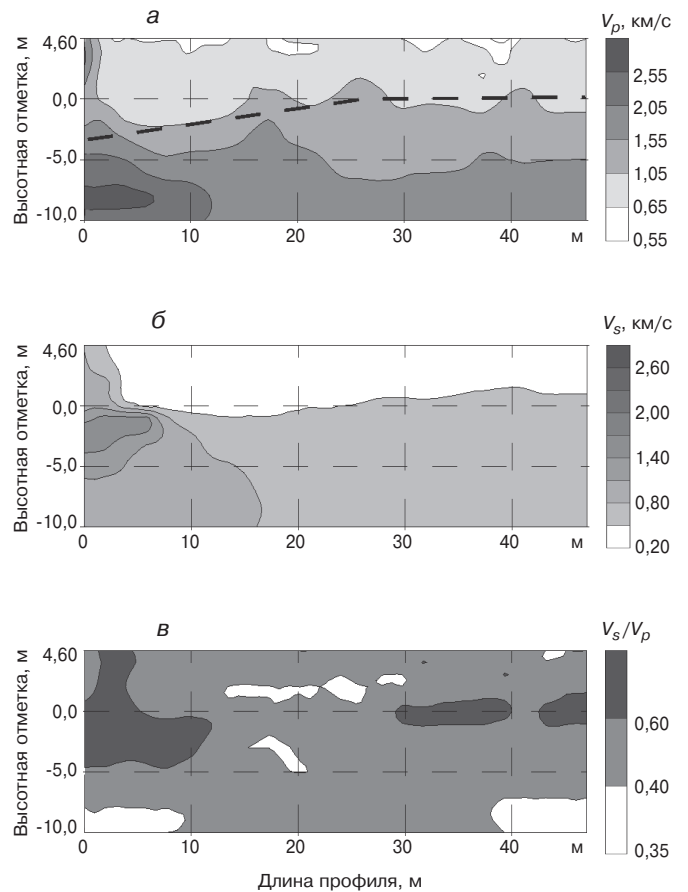


Рис. 2. Томограммы скоростей продольных (а), поперечных (б) волн и отношения V_s/V_p (в) по данным натурных измерений

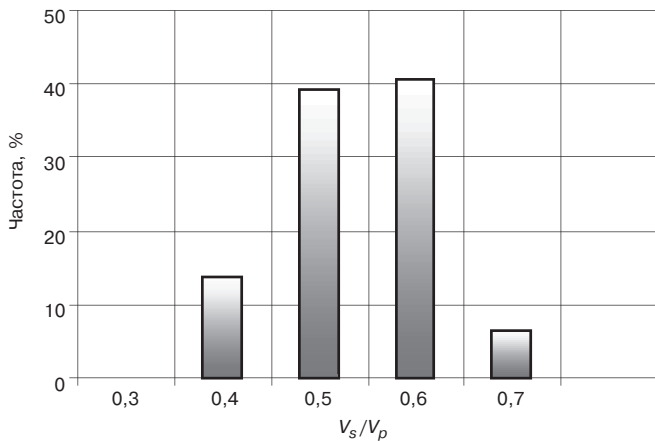


Рис. 3. Гистограмма распределения отношения V_s/V_p по данным натурных измерений

пониженным соотношением V_s/V_p в диапазоне 0,35 - 0,4. Эти зоны можно ассоциировать как увлажнённые.

Гистограмма распределения V_s/V_p , представленная на рис. 3, показывает, что характерные значения отношений V_s/V_p составляют 0,4 - 0,7. Это присуще грунтам с низким водонасыщением. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о низкой пористости слоя за-

мещённого грунта, а уплотнение соответствует проектным требованиям.

Методика оценки качества уплотнения прошла проверку на специально созданном на площадке ПДХ эталонном блоке замещённого грунта и показала полностью сопоставимые и адекватные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов Н. Н., Кабеев Е. В., Антипов А. Г.*, 2001, Использование метода сейсмической томографии при мониторинге состояния грунтовых плотин: Гидротехническое строительство, **9**, 34 - 38.
2. *Жарницкий В. Я.*, 2004, Оценка качества укладки горной массы из известняков в упорные призмы каменно-земляных плотин: Гидротехническое строительство, **12**, 22 - 25.
3. РСН 66-87. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка., Госстрой РСФСР.
4. *Руководство по геотехническому контролю за подготовкой оснований и возведением грунтовых сооружений в энергетическом строительстве*, РД34 15.073-91, 1991, Л., ВНИИГ.
5. *Савич А. И., Яценко*, 1979, Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами: М., Недра.
6. СНиП 3.02.01-87 - Земляные сооружения, основания, фундаменты. Госстрой РФ.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Николай Николаевич АБРАМОВ - старший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН, чл.-кор. МАНЭБ.