

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЛИНЕЙНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИРОДНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СЛАБОФИЛЬТРУЮЩИХ ГРУНТОВ

USING THE LINEAR INTERPOLATION METHOD TO DETERMINE THE PARAMETERS OF THE NATURAL STRESS STATE OF WEAKLY FILTERED SOILS

А. Н. ТРУФАНОВ, канд. техн. наук

В статье рассматривается метод определения природного порового и вертикального эффективного напряжения в слоях слабофильтрующих глинистых грунтов. Отмечена разница подходов в определении этих параметров в России и за рубежом. Предложен альтернативный метод определения порового давления в слабофильтрующих слоях грунтов, основанный на линейной интерполяции. Метод позволяет учитывать влияние напора подземных вод под слоем слабофильтрующего грунта.

The article considers a method for determining the in situ pore pressure and vertical effective stress in layers of weakly filtering clay soils. The difference of approaches in determining these parameters in Russia and abroad is noted. An alternative method for determining pore pressure in weakly filtering soil layers based on linear interpolation is proposed. The method allows you to take into account the effect of groundwater pressure under a layer of weakly filtering soil.

Ключевые слова:

Поровое давление, природное эффективное напряжение, глинистые грунты, метод линейной интерполяции

Key words:

Pore pressure, natural effective stress, clay soils, linear interpolation method

Важным этапом геотехнических расчетов является достоверное определение природного вертикального эффективного напряжения от собственного веса грунта. Данный параметр используется для определения размеров сжимаемой толщи при расчетах осадок оснований

фундаментов, при определении характеристик переуплотнения грунтов и при назначении исходных условий проведения полевых и лабораторных испытаний.

Одним из основных принципов современной механики грунтов является принцип эффективных напряжений Терцаги, устанавливающий взаимосвязь между напряжениями в грунтах (1958) [1]. В соответствии с данным принципом эффективное напряжение σ'_i определяется как разница между полным напряжением σ_i и поровым давлением u_i

$$\sigma'_i = \sigma_i - u_i. \quad (1)$$

Величина полного вертикального напряжения рассчитывается методом послойного суммирования в соответствии с СП 22.13330 Основания зданий и сооружений [2]. Обычно определение полного напряжения вопросов не вызывает, а вот по определению порового давления мнения специалистов расходятся. В частности, споры вызывает вопрос определения порового давления в водоупорных или слабофильтрующих слоях грунтов (СФГ) полутвердой и твердой консистенции.

Анализ отечественных и зарубежных источников, выполненный автором в работе [3], показал следующее.

В отечественных и зарубежных источниках поровое давление в грунтах определяется одинаково, в соответствии с законом гидростатического распределения. Исключение составляют слабофильтрующие глинистые грунты полутвердой и твердой консистенции (СФГ).

В отечественных трудах по механике грунтов полагают, что поровое давление в СФГ отсутствует и его предлагается обнулять [4–7]. В результате, в соответствии с принципом эффективных напряжений Терцаги с учетом формулы (1), вертикальное эффективное напряжение в СФГ принимается равным полному давлению.

В то же время в зарубежных источниках гидростатический закон распределения порового давления принимается для всех грунтов без исключения, вне зависимости от их фильтрационных свойств и консистенции [8–12].

Как было показано в работе [3], наличие фильтрационно-консолидационных процессов в слабофильтрующих глинистых грунтах, подтвержденных результатами лабораторных исследований, а также прямые измерения порового давления полевыми методами убедительно доказывают существование порового давления в СФГ.

Вместе с тем принимаемое за рубежом гидростатическое распределение порового давления в слоях СФГ также следует признать большим упрощением.

Действительно, гидростатический характер распределения порового давления внутри слоя слабофильтрующего грунта справедлив в случае равных значений пьезометрического напора, определяемого уровнем подземных вод (УПВ), над кровлей и под подошвой слоя. Однако результаты инженерно-геологических изысканий показывают, что эти уровни могут существенно отличаться. Чаще всего это связано с откачками воды из подстилающего слой СФГ водоносного горизонта. В результате разницы напоров в слое слабофильтрующего грунта возникает фильтрационный поток, направленный сверху вниз.*

На рисунке 1 проиллюстрирован процесс изменения порового давления в слое СФГ в результате снижения УПВ в подстилающем водоносном горизонте.

* Примечание: возможна и обратная фильтрация снизу вверх. Именно такой вариант был рассмотрен в работах авторов Роза С.А. [13], и Briaud J. L. (2013) [11] (раздел 1.1). Однако данный вариант встречается значительно реже.

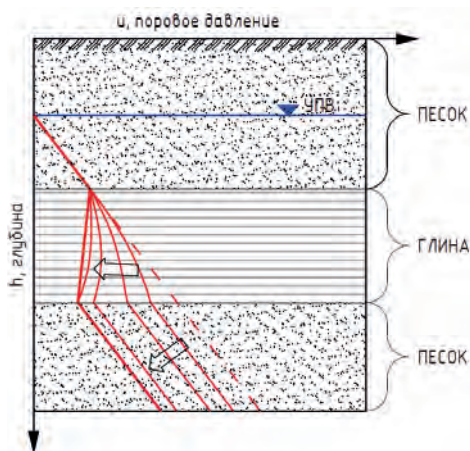


Рис. 1. Изменение порового давления в слое слабофильтрующего грунта во времени

Линейный характер изменения порового давления с глубиной нашел экспериментальное подтверждение при мониторинге грунтов основания многофункционального высотного комплекса «Лахта Центр» в г. Санкт-Петербург, выполненных компанией ООО «ПИ Георекострукция».

На рисунке 2 представлен геологический разрез грунтов, залегающих в основании комплекса.

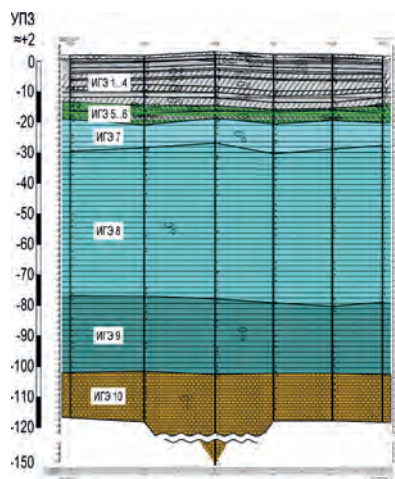


Рис. 2. Геологический разрез площадки строительства МФЦ «Лахта Центр» в Санкт Петербурге

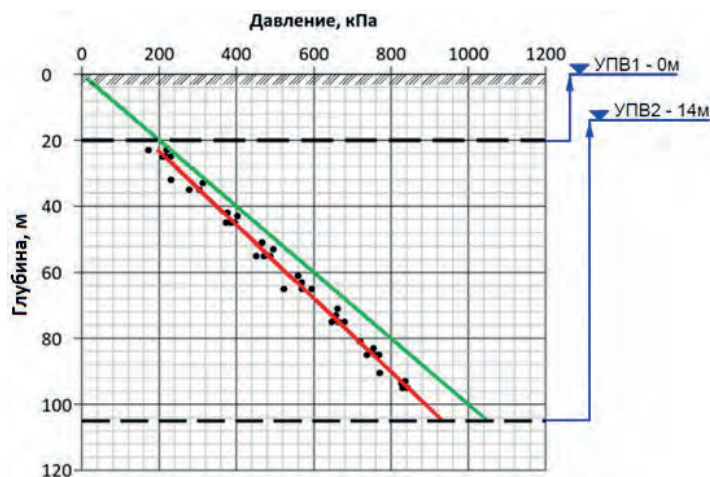


Рис. 3. График распределения природного порового давления по глубине на объекте строительства МФЦ «Лахта Центр» в Санкт Петербурге

Слой слабофильтрующих вендских отложений был представлен инженерно-геологическими элементами ИГЭ № 7, 8 и 9 общей мощностью около 100 м. Под толщей СФГ вендских отложений залегали скальные грунты гдовского водоносного горизонта, представленные ИГЭ 10.

Для исследования распределения порового давления в вендских отложениях были изготовлены 5 наблюдательных выработок, снабженных многоуровневыми скважинными пьезометрами РК45М фирмы «SISGEO» (Италия). Установка датчиков в скважинах производилась методом полного заполнения раствором [14]. Измерения производились по всей глубине условно на 8-ми различных уровнях. Результаты измерений природного порового давления, выполненные до начала строительных работ представлены на рисунке 3.

Зеленой линией на графике показано гидростатическое давление, красной – линия тренда, полученная по точкам фактических замеров порового давления.

Как видим, обозначенные точками значения порового давления располагаются ниже линии гидростатического давления, а их положение на графике хорошо описывается линейной зависимостью. При этом разница между гидростатическим и поровым давлением на подошве вендских отложений составляет 0.14 МПа, что соответствует разнице УПВ в 14 м над слоем вендских отложений и под ним. Полученная экспериментальная зависимость распределения порового давления по глубине хорошо согласуется с принятым выше допущением. Это подтверждает возможность определения значений порового давления внутри слоя СФГ по глубине способом линейной интерполяции.

В качестве иллюстрации на рисунке 4 представлена условная схема к определению порового давления в слое СФГ способом линейной интерполяции. Кровля слоя СФГ расположена на отметке h_k , а подошва – на отметке h_n .

Слой СФГ перекрывается водоносным горизонтом с уровнем подземных вод $h'_{узв}$.

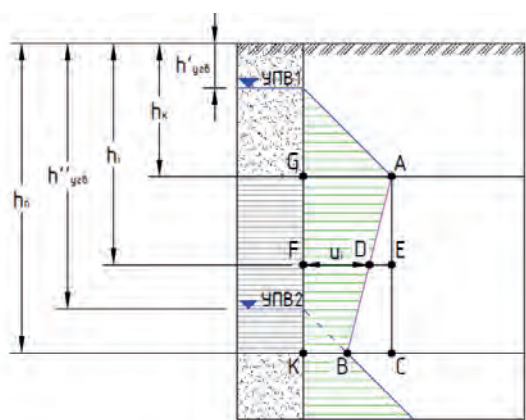


Рис. 4. Схема к определению порового давления в слое слабофильтрующего грунта

Снизу слабофильтрующего слоя грунта расположен подстилающий водоносный горизонт с уровнем подземных вод $h''_{узв}$.

На представленной схеме пьезометрический уровень в подстилающем водоносном горизонте $h''_{узв}$ расположен ниже, чем в водоносном горизонте над кровлей слоя. Эпюра распределения порового давления по глубине выделена зеленой штриховкой. В соответствии с изложенными выше допущением распределение порового давления внутри слоя принимается в виде линейного участка АВ, соединяющего значения порового давления на кровле слоя СФГ и под его подошвой.

Используя построенную эпюру, определим величину порового давления u_i на глубине h_i . Искомое значение порового давления u_i на эпюре определяется участком FD, равным

$$FD = FE - DE \quad (2)$$

с учетом того, что $FE = GA$ получим

$$FD = GA - DE \quad (3)$$

Из подобия треугольников ABC и ADE следует, что

$$DE/BC = AE/AC, \quad (4)$$

отсюда получим

$$DE = BC \cdot AE / AC \quad (5)$$

Подставив полученное выражение в формулу (3), получим

$$FD = GA - BC \cdot AE / AC \quad (6)$$

Принимая во внимание, что $BC = KC - KB$, а $KC = GA$, получим

$$BC = GA - KB \quad (7)$$

Подставив полученное значение CB в формулу (6), получим

$$FD = GA - (GA - KB) \cdot AE / AC \quad (8)$$

Участки эпюры порового давления GA и KB (рис. 4) соответствуют поровому давлению на кровле u_k и на подошве u_n слабофильтрующего слоя, определяемые по формулам

$$GA = u_k = (h_k - h'_{y26}) \gamma_w \quad (9)$$

$$KB = u_n = (h_n - h''_{y26}) \gamma_w, \quad (10)$$

где γ_w – удельный вес воды.

Подставив в формулу (8) вместо буквенных обозначений соответствующие им символы из рисунка 4, а также с учетом формул (9) и (10) получим:

$$u_i = \gamma_w (h_k - h'_{y26}) - \gamma_w [(h_k - h'_{y26}) - (h_n - h''_{y26})] \cdot (h_i - h_k) / (h_n - h_k), \quad (11)$$

где γ_w – удельный вес воды, равный 1 г/см^3 .

Полное давление от веса вышележащих слоев грунта на рассматриваемой глубине – h_i рассчитывается методом послойного суммирования по формуле

$$\sigma_i = [\gamma_1 \cdot h'_{y26} + \gamma_2 \cdot (h_k - h'_{y26}) + \gamma_3 (h_i - h_k)] \cdot 10^{-2}. \quad (12)$$

В соответствии с принципом эффективных напряжений Терцаги (1) и с учетом выражений (11) и (12) после небольших преобразований получим развернутое выражение для определения природного вертикального эффективного напряжения:

$$\sigma'_i = [\gamma_1 \cdot h'_{y26} + \gamma_2 (h_k - h'_{y26}) + \gamma_3 (h_i - h_k) - \gamma_w (h_i - h'_{y26}) + \gamma_w (h''_{y26} - h'_{y26}) (h_i - h_k) / (h_n - h_k)] \cdot 10^{-2} \quad (13)$$

Таким образом, мы получили необходимые выражения для определения параметров природного напряженного состояния слабофильтрующего грунта по глубине.

Рассмотрим использование полученных выражений на конкретных примерах. Используя принципиальную схему, представленную на рисунке 4, примем следующие исходные условия:

глубина залегания кровли СФГ $h_k = 3 \text{ м}$,

мощность слоя $S = 4 \text{ м}$,

уровень подземных вод над кровлей СФГ $h'_{y26} = 1 \text{ м}$,

глубина определения порового давления $h_i = 5 \text{ м}$.

Удельный вес песка выше УПВ – γ_1 , примем равным 1.8 г/см^3 , вес песка ниже УПВ – $\gamma_2 = 1.9 \text{ г/см}^3$, удельный вес глины – $\gamma_3 = 2.1 \text{ г/см}^3$.

С учетом данных условий, используя выражение (12), получим значение полного давления $\sigma_i = 0.098 \text{ МПа}$.

Рассмотрим различные варианты возможного напора подземных вод в подстилающем слое СФГ водоносном горизонте.

На рисунке 5 схематически представлены четыре варианта положения УПВ под подошвой слоя СФГ.

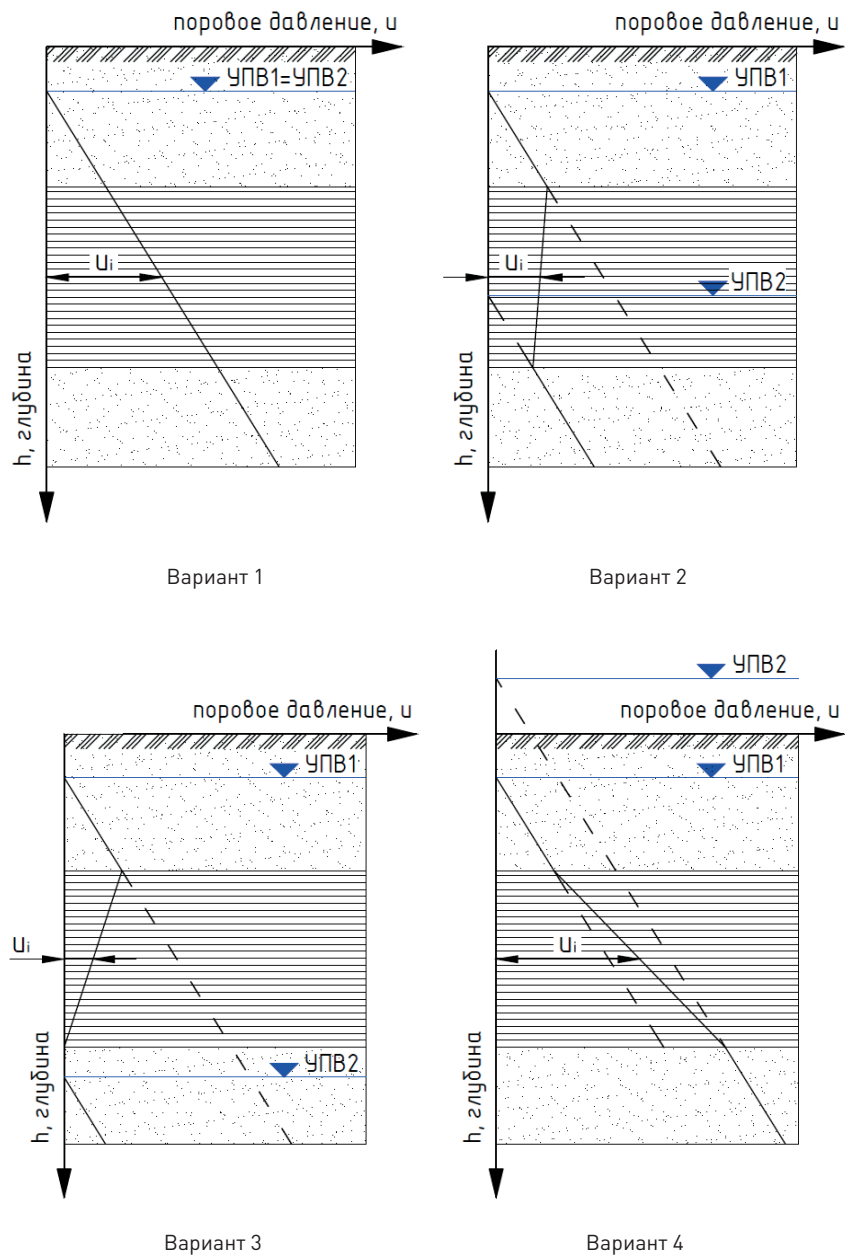


Рис. 5. Варианты возможного положения уровня подземных вод под подошвой слоя СФГ:

- 1 – УПВ под подошвой равен уровню над кровлей; 2 – УПВ под подошвой меньше, чем над кровлей;
3 – УПВ под подошвой ниже отметки подошвы слоя; 4 – УПВ под подошвой выше, чем над кровлей слоя

Используя формулы (11, 13), определим значение порового давления и природного вертикального эффективного напряжения в середине слоя СФГ для каждого из рассмотренных вариантов.

Вариант 1 – уровни подземных вод над кровлей и под подошвой СФГ равны $h''_{\text{угв}} = h'_{\text{угв}} = 1$

Подставив необходимые значения в формулу (11), получим:

$$u_i = 4 \cdot 10^{-2} \text{ МПа.}$$

Вертикальное эффективное напряжение составит:

$$\sigma'_i = \sigma_i - u_i = 0.058 \text{ МПа.}$$

На рисунке 6 представлены графики распределения по глубине порового давления, полного и эффективного напряжений для 1 варианта распределения УПВ.

Данный вариант соответствует гидростатическому распределению порового давления по глубине в СФГ, что, как указывалось выше, принято за рубежом. Однако, как будет показано на следующих примерах, это далеко не единственный вариант возможного распределения порового давления в слоях СФГ.

Вариант 2 – уровень подземных вод под подошвой СФГ ниже, чем над кровлей СФГ

Пусть уровень подземных вод под подошвой СФГ будет равен 4 м.

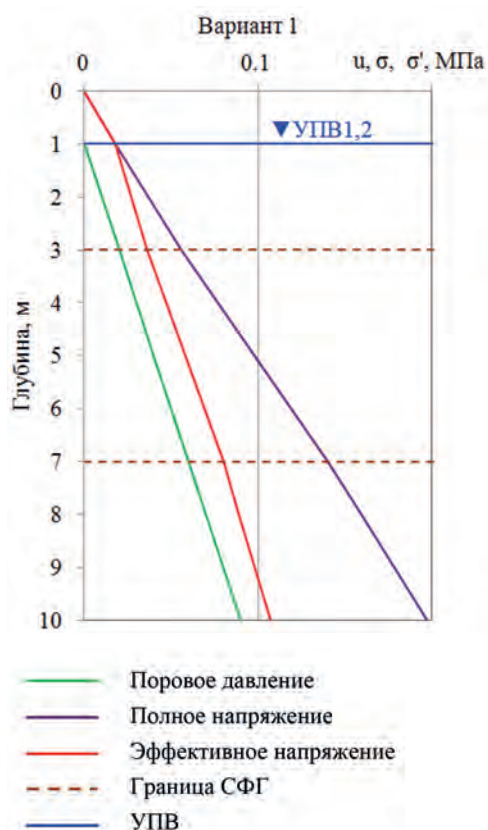


Рис. 6. Графики распределения напряжений по глубине при равных уровнях подземных вод над кровлей и под подошвой слоя

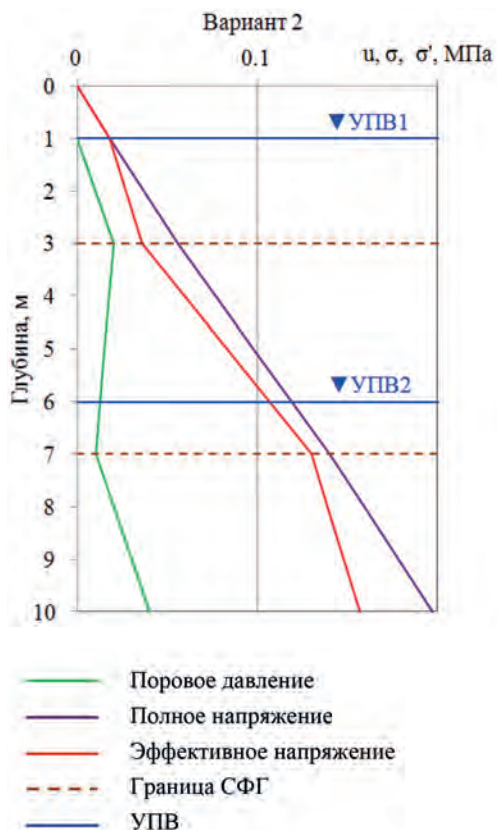


Рис. 7. Графики распределения напряжений по глубине при уровне подземных вод под подошвой СФГ ниже, чем над кровлей

Подставив значения в формулу (11), получим:

$$u_i = 0.015 \text{ МПа.}$$

В свою очередь вертикальное эффективное напряжение составит:

$$\sigma'_i = \sigma_i - u_i = 0.083 \text{ МПа.}$$

На рисунке 7 представлены графики распределения по глубине порового давления, эффективного и полного напряжений для 2 варианта распределения УПВ.

Сравнивая графики, представленные на рисунках 6 и 7 видно, что снижение уровня подземных вод под слоем СФГ приводит к росту эффективных напряжений с глубиной, увеличиваясь к подошве слоя.

Вариант 3 – уровень подземных вод под подошвой СФГ ниже или равен отметке подошвы СФГ

Если уровень подземных вод под подошвой СФГ ниже отметки подошвы СФГ, то для расчета его следует принимать равным отметке подошвы слоя СФГ $h''_{\text{угв}} = h_n$.

Подставив соответствующие значения в формулу (11), получим:

$$u_i = 0.01 \text{ МПа.}$$

Вертикальное эффективное напряжение при этом составит:

$$\sigma'_i = \sigma_i - u_i = 0.088 \text{ МПа.}$$

Ниже, на рисунке 8, представлены графики распределения по глубине порового давления, полного и эффективного напряжений для 3 варианта распределения УПВ.

Как видим, в случае отсутствия пьезометрического напора под подошвой СФГ (рис. 8) эффективное напряжение на подошве слоя становится максимальным, достигая величины полного напряжения. Такая ситуация встречается при полной разгрузке вод нижележащего водоносного горизонта. Как, например, в районе деревни Старосьяново Московской области, где под слоем водонасыщенных глин залегают известняки с сетью осушенных карстовых пещер. Сброс воды из известнякового горизонта происходит через береговые обнажения реки Пахра.

Вариант 4 – уровень подземных вод под подошвой СФГ выше пьезометрического давления над кровлей СФГ (артезианский напор)

Пусть уровень подземных вод под подошвой СФГ будет превышать УПВ над кровлей на 4 м (артезианский напор). В принятой нами системе координат пьезометрический уровень под подошвой СФГ составит минус 3 м.

Подставив соответствующие значения в формулу (11) получим:

$$u_i = 0.06 \text{ МПа.}$$

Вертикальное эффективное напряжение составит

$$\sigma'_i = \sigma_i - u_i = 0.038 \text{ МПа.}$$

На рисунке 9 представлены графики распределения по глубине порового давления, полного и эффективного напряжений для 4 варианта распределения УПВ.

Из представленного графика следует, что в случае артезианского напора (рис. 9) эффективное напряжение на подошве слоя снижается. При достаточно высоких значениях порового давления эффективное напряжение может понизиться до нулевых и даже отрицательных значений, что может приводить к разуплотнению и потере несущей способности грунта.

На возможность возникновения подобной ситуации указывал в своей работе С. А. Роза [9]. Однако, на наш взгляд, он ошибочно полагал, что максимальное разуплотнение будет происходить на кровле СФГ, а не на подошве слоя.

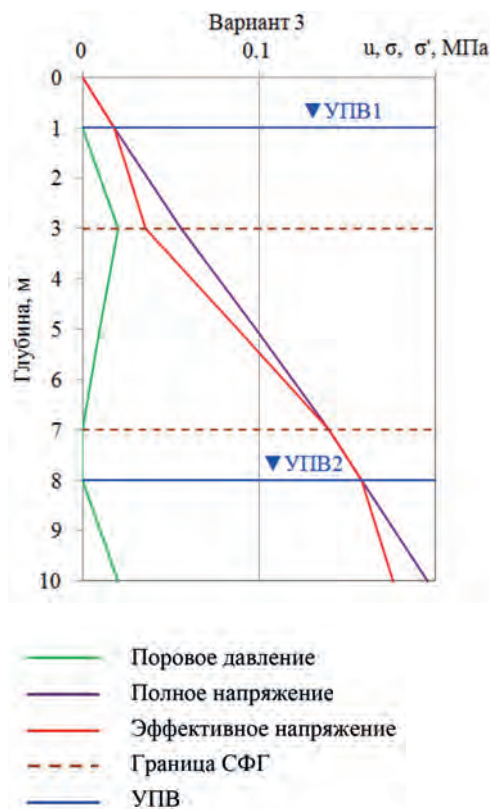


Рис. 8. Графики распределения напряжений по глубине при уровне подземных вод под подошвой слоя СФГ ниже отметки подошвы

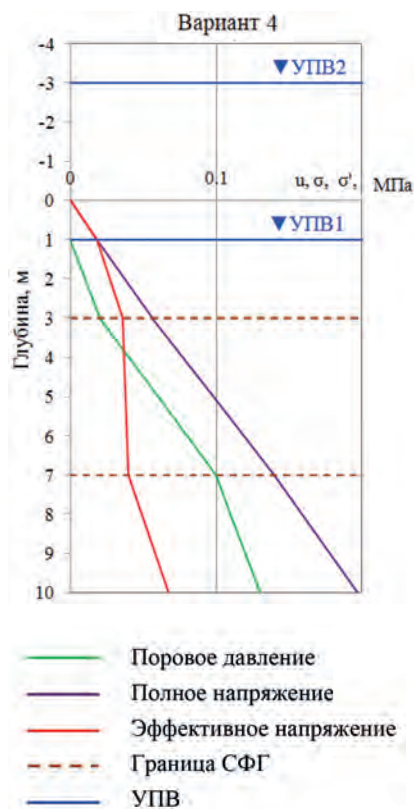


Рис. 9. Графики распределения напряжений по глубине при уровне подземных вод под подошвой слоя СФГ выше, чем над кровлей

Как следует из приведенных примеров, предложенная для расчета порового давления внутри слоя слабофильтрующего грунта формула (11) может быть применена при любых вариантах расположения уровня подземных вод под слоем СФГ.

На рисунке 10 представлен график зависимости величины эффективного напряжения от глубины при разных вариантах расположения УПВ под подошвой СФГ.

Как видно из графика, значения эффективных напряжений в середине слоя СФГ в зависимости от величины УПВ под подошвой различаются более чем в 2 раза. При этом влияние разницы напоров возрастает по направлению от кровли к подошве слоя СФГ.

Следует отметить, что использование метода интерполяции возможно только при известном уровне подземных вод под слоем СФГ. Это следует учитывать при назначении глубины горных выработок в процессе проведения инженерно-геологических изысканий.

Для верификации предложенного метода был использован альтернативный способ определения величины эффективного напряжения в слое СФГ через «гидродинамическое давление». Гидродинамическое давление, по определению, это сила, передаваемая потоком воды единице объема грунта. Основоположник отечественной механики грунтов Н. М. Герсегованов отмечал следующее: «...гидродинамическое давление почти не зависит от скорости фильтрации и в глинах, где она чрезвычайно мала, давление это существует не в меньшей

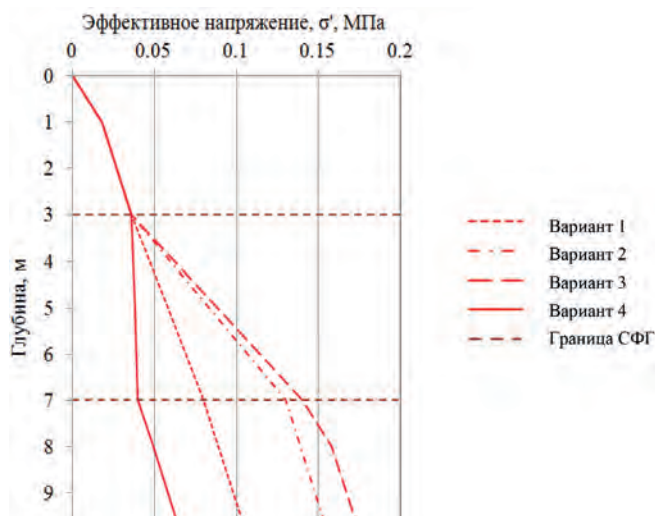


Рис. 10. График зависимости величины эффективного напряжения от глубины при разных значениях уровня подземных вод под подошвой СФГ

мере, нежели в песках» [15]. Таким образом, использование расчетов на основе гидродинамического давления в СФГ является вполне корректным.

Величина гидродинамического давления D рассчитывается по формуле (14):

$$D = I \cdot \gamma_w, \quad (14)$$

где I – градиент напора, д. е.;

γ_w – удельный вес воды, г/см³.

Градиент напора, в свою очередь, описывается выражением (15):

$$I = \Delta h / S, \quad (15)$$

где Δh – разница напоров (в нашем случае разница пьезометрических уровней на кровле и на подошве слоя), м;

S – мощность слоя СФГ, м.

Размерность гидродинамического давления соответствует размерности удельного веса воды – г/см³.

Указанная размерность показывает, что гидродинамическое давление является объемной силой, аналогичной взвешивающему действию воды. Поэтому гидродинамическое давление при вертикальной фильтрации, по существу, оказывает влияние на удельный вес грунта.

Так, при определении вертикального эффективного напряжения при наличии в слое СФГ фильтрационного потока (пьезометрический напор на подошве СФГ ниже или выше, чем на кровле) удельный вес грунта в СФГ следует рассчитывать по формуле (16):

$$\gamma = (\gamma_3 - \gamma_w) + D \quad (16)$$

С учетом формул (14) и (15) получим:

$$\gamma = (\gamma_3 - \gamma_w) + \Delta h / S \cdot \gamma_w \quad (17)$$

Методом послойного суммирования определим эффективное напряжение. Для этого используем следующее выражение (18):

$$\sigma'_i = [\gamma_1 \cdot h'_{\text{ягв}} + (\gamma_2 - \gamma_w) \cdot (h_k - h'_{\text{ягв}}) + \gamma(h_i - h_k)] \cdot 10^{-2} \quad (18)$$

Значение γ с учетом формулы (17) и принятых обозначений (рис. 4) определится из выражения (19):

$$\gamma = (\gamma_3 - \gamma_w) + \gamma_w (h''_{y26} - h'_{y26}) / (h_n - h_k) \quad (19)$$

В развернутом виде выражение для определения эффективного напряжения примет вид:

$$\sigma'_i = [\gamma_1 \cdot h'_{y26} + (\gamma_2 - \gamma_w) \cdot (h_k - h'_{y26}) + (\gamma_3 - \gamma_w) (h_i - h_k) + \gamma_w (h''_{y26} - h'_{y26}) (h_i - h_k) / (h_n - h_k)] \cdot 10^{-2}. \quad (20)$$

После перегруппировки членов получим:

$$\sigma'_i = [\gamma_1 \cdot h'_{y26} + \gamma_2 (h_k - h'_{y26}) + \gamma_3 (h_i - h_k) - \gamma_w (h_i - h'_{y26}) + \gamma_w (h''_{y26} - h'_{y26}) (h_i - h_k) / (h_n - h_k)] \cdot 10^{-2} \quad (21)$$

Как видим, выражение (21) полностью совпадает с полученной ранее формулой (13) для определения природного вертикального эффективного напряжения методом линейной интерполяции, что подтверждает справедливость предлагаемого метода.

Выводы и рекомендации

1. В условиях установившегося или медленно изменяющегося пьезометрического напора в водоносном горизонте, залегающем под подошвой слоя СФГ, распределение порового давления внутри этого слоя может быть описано линейной зависимостью.

2. Для определения порового давления внутри слоя СФГ при проведении различных геотехнических расчетов, включая расчеты осадок фундаментов, предлагается использовать линейную интерполяцию между значениями порового давления на кровле и под подошвой слоя.

3. В зависимости от величины пьезометрического напора под подошвой значения эффективных напряжений в слое СФГ могут различаться в несколько раз, причем влияние разницы напоров возрастает по направлению от кровли к подошве слоя.

4. Важным преимуществом метода линейной интерполяции является возможность учета любых вариантов распределения порового давления в массиве грунта.

5. Использование способа интерполяции при отсутствии прямых измерений порового давления в слоях слабо фильтрующих грунтов повысит надежность геотехнических расчетов оснований фундаментов.

Библиографический список

1. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. – М.: Госстройиздат, 1958, – 608 с.
2. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений – М.: Стандартинформ, 2016
3. Труфанов А.Н. Поровое давление в водоупорных слоях грунтов, Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 26 – 29 ноября 2019 г. [Электронный ресурс] – <http://www.geomark.ru/wp-content/uploads/2019/04/Materialy-XV-konf-2019.pdf>
4. Медков Е.И., Березенцев В.Г., Гольдштейн М.Н., Царьков А.А. Механика грунтов, основания и фундаменты – М.: Транспорт, 1970. – 69 с.

5. Далматов Б.И. Механика грунтов. Часть 1. Основы геомеханики – Москва, 2000.
6. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов – М.: МГСУ Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 177 с.
7. Болдырев Г.Г. и Малышев М.В. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах), Пензенский государственный университет, 2009, 411 с.
8. Vögt S. R. K. Vorträge Lehrstuhl für Grundbau. Bodenmechanik. Felsmechanik und Tunnelbau. Zentrum Geotechnik 2001. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.bgu.tum.de/>
9. Martin F. Compression and Consolidation. Geomechanics 255. part 1. Compression and Consolidation. – 2011. – p. 7-8, 11-12.
10. Settlement-calculation. University of Sydney. Soil Mechanics CIVL2410 [Электронный ресурс]. – 2011. URL: <https://www.coursehero.com/file/6377068/L09-1-d-settlement-calculation/>.
11. Briaud J.-L. Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils Copyright C by John Wiley & Sons, Inc. – 2013. – 255 p.
12. Fellenius B. H. Basics of Foundation Design [Электронный ресурс]. – 2014. URL: <https://ru.scribd.com/document/259265396/Basics-of-Foundation-Design-Fellenius>.
13. Поза С.А. Механика грунтов – М.: Высшая школа, 1962. – С. 72-76
14. Simonsen T. R., Sorensen K. K. Field measurements of pore-water pressure changes in a stiff fissured very high plasticity Palaeogene clay during excavation and pile driving// Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – Seoul: – 2017. – p. 2865-2868
15. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е., Теоретические основы механики грунтов и их практические применения, Москва, 1948 г., 247 с.

Автор

Александр Николаевич ТРУФАНОВ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Методов исследования грунтов» НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
Alexander TRUFANOV, Ph. D. (Engineering), Head of Laboratory of soils investigation methods, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: trufanov54@gmail.com