

УДК 624.139

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2\(29\)-112-122](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2(29)-112-122)

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА УЧЕТА ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОДОУПОРНОМ СЛОЕ НА РАСЧЕТ ОСАДКИ ОСНОВАНИЯ

## INFLUENCE OF THE METHOD OF ACCOUNTING FOR PORE PRESSURE IN THE WATER-RESISTANT LAYER ON THE CALCULATION OF FOUNDATION PRECIPITATION

А. Н. ТРУФАНОВ, канд. техн. наук

*Рассматриваются факторы, влияющие на расчет осадки фундамента условного здания в связи с учетом природного порового давления в водоупорных слоях. Приведено сравнение расчета осадки фундамента условного здания с учетом и без учета порового давления методом послойного суммирования и методом конечных элементов. Определены основные факторы влияния порового давления на величину расчетной осадки: размер сжимаемой зоны, модуль деформации и параметры переуплотнения грунтов. Отмечено разнонаправленное действие факторов на величину расчетной осадки.*

*The article considers the factors that affect the calculation of the conditional foundation precipitation, in connection with taking into account the natural pore pressure in the water-resistant layers. A comparison of the calculation of the conditional foundation sediment with and without pore pressure by the layer-by-layer summation method and the finite element method is presented. The main factors influencing the pore pressure on the calculated precipitation – the size of the compressible zone, the modulus of soil deformation, and the parameters of over consolidation – are determined. The multidirectional effect of factors on the value of the calculated precipitation is noted.*

### Ключевые слова:

*Водоупорный слой, модуль деформации, параметры переуплотнения грунтов, поровое давление, расчетная осадка, сжимаемая зона*

### Key words:

*Water-resistant layer, modulus of deformation, parameters of soil re-compaction, pore pressure, calculated sediment, compressible zone*

В настоящее время при расчете осадок оснований фундаментов существуют две противоположные точки зрения, связанные со способом учета порового давления в водоупорных глинах или слабо фильтрующих слоях грунтов (СФГ).

Согласно первой, характерной для отечественных исследователей, поровое давление в СФГ полностью отсутствует. Эта позиция представлена в трудах Герсванова Н. М., Польшина Д. Е. [1], Медкова В. Г. [2], Далматова Б. И. [3], Болдырева Г. Г. [4], Тер-Мартirosяна З. Г. [5] и др. Указанный подход применялся в нормах вплоть до последнего времени, включая редакцию СП 22.13330-2011 «Основания зданий и сооружений».

Вторая точка зрения, распространенная за рубежом, заявляет о наличии порового давления в любых водонасыщенных глинистых грунтах независимо от их фильтрационных свойств и консистенции. Такого подхода придерживался классик механики грунтов Карл Терцаги [6], а также Briaud J.-L. [7], Fellenius В. Н. [8], Vogt S. R. К. [9] и многие другие.

Развитие технических средств в области инженерных изысканий позволило внести ясность в этот спор. Так, в результате многочисленных экспериментальных исследований были убедительно доказаны факт существования порового давления в СФГ и возможность его прямого измерения [10]. Не могли игнорировать указанный факт и разработчики отечественных нормативных документов. В результате в действующую редакцию СП 22.13330-2016 [11] были внесены коррективы по учету порового давления в СФГ.

Задачей статьи является качественная оценка влияния порового давления на расчет осадок оснований, сложенных слабо фильтрующими грунтами.

В соответствии с принципом эффективных напряжений Терцаги поровое давление  $u_i$  является исходным параметром для определения природного вертикального эффективного напряжения от собственного веса грунта  $\sigma'_{oi}$  и определяется по формуле

$$\sigma'_{oi} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i - u_i, \quad (1)$$

где  $n$  – номер слоя грунта, в котором расположена рассматриваемая точка;  $\gamma_i$  и  $h_i$  – соответственно удельный вес и толщина  $i$ -го слоя грунта над рассматриваемой точкой.

Вертикальное эффективное напряжение  $\sigma'_{oi}$  используется при определении ряда параметров, необходимых при расчете осадки основания фундамента, в частности:

- нижней границы сжимаемой толщи;
- модуля деформации;
- параметров переуплотнения грунтов.

Рассмотрим влияние способа учета порового давления на каждый из приведенных параметров в отдельности и на величину осадки в целом.

### **Выбор расчетной схемы фундамента условного здания и характеристик грунтов основания**

Для оценки анализа используем расчетную схему здания на условном плитном фундаменте, в основании которого залегает слой СФГ.

Предложенная схема к расчету осадок фундамента условного здания представлена на рис. 1.

Основание фундаментной плиты в верхней части представлено суглинком, под которым залегает слой СФГ. Под подошвой слоя СФГ расположен водоносный горизонт, представленный известняками. Для простоты пьезометрические уровни воды над кровлей и под подошвой слоя СФГ примем равными, соответствующими уровню подземных вод (УПВ) на рис. 1.

Для фундаментной плиты примем следующие параметры:

- ширина 17 м;
- длина 28 м;
- глубина заложения 4 м.

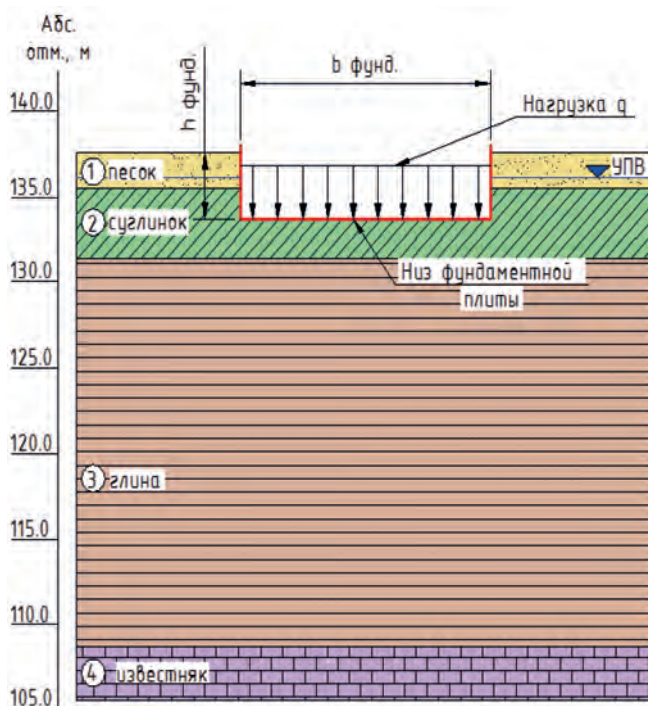


Рис. 1. Схема к расчету осадки основания фундамента

Среднее давление, передаваемое фундаментной плитой на основание, принято равномерно распределенным. Среднее давление, передаваемое фундаментной плитой на основание, примем равным 200 кПа, что соответствует нагрузке от жилого 12-этажного здания с подвалом.

Геологическое строение основания принято по результатам реальных изысканий под строительство одного из объектов города Москвы и являются типичными для Московского региона:

ИГЭ-1 – песок средней крупности, средней плотности с включениями до 15% гравия, гальки, afQIIms;

ИГЭ-2 – среднечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные отложения московского горизонта (afQIIms): суглинки тугопластичные, с прослоями супесей пластичных;

ИГЭ-3 – средне-верхнеюрские нерасчлененные отложения оксфордского и келловейского ярусов (J2-3ox-cl): глины твердые и полутвердые;

ИГЭ-4 – верхнекаменноугольные отложения (C3rt): известняки малопрочные, с прослоями глин и мергелей.

В табл. 1 приведены физические характеристики грунтов, перечисленных ИГЭ.

Таблица 1

**Физические характеристики грунтов, принятых для расчетной схемы**

| № ИГЭ | Наименование грунта, геологический индекс              | Природная влажность $W$ , д.с. | Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент пористости $e$ | Показатель текучести $I_L$ | Модуль деформации $E$ , МПа | Угол внутреннего трения $\varphi$ , град.            | Сцепление $c$ , кПа |
|-------|--|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|---------------------|
| 1     | 2  | 3                              | 4                                    | 5                          | 6                          | 7                           | 8  | 9                   |
| ИГЭ-1 | Насыпной грунт, песок средней крупности                | 0,20                           | 1,88                                 | 0,65                       | -                          | 30                          | 35   | 1                   |
| ИГЭ-2 | Суглинки тугопластичные с прослоями супесей пластичных | 0,20                           | 2,02                                 | 0,60                       | 0,42                       | 15                          | 27   | 20                  |
| ИГЭ-3 | Глины твердые прослоями, полутвердые                   | 0,41                           | 1,77                                 | 1,16                       | -0,04                      | 27                          | 19   | 38                  |
| ИГЭ-4 | Известняк малопрочный                                  | 0,05                           | 2,15                                 | 0,27                       | -                          | 116                         | Предел прочности на одноосное сжатие $R_c = 7,1$ МПа |                     |

**Определение нижней границы сжимаемой толщи для двух способов учета порового давления**

Рассмотрим определение нижней границы сжимаемой толщи без учета и с учетом порового давления в слое СФГ. Оценку проведем на основе представленной на рис. 1 схемы к расчету осадки основания фундамента.

Варианты способа учета порового давления в СФГ проиллюстрированы на эпюрах, представленных на рис. 2.

При варианте учета порового давления в слое СФГ принимается гидростатический характер распределения по глубине (рис. 2, в). Это отвечает зарубежной практике геотехнических расчетов [5 – 9]. Следует отметить, что в расчетах могут приниматься и другие варианты распределения порового давления в СФГ, как это отражено в действующей редакции СП 22.13330-2016 [11] и подробно рассмотрено в работе [12]. Однако в нашем случае – при одинаковом пьезометрическом уровне подземных вод сверху и снизу слоя СФГ – выбор гидростатического распределения порового давления себя полностью оправдывает.

Нижнюю границу сжимаемой толщи определим в соответствии с требованиями п. 5.6.41 СП 22.13330.2016 [11].

График для определения нижней границы сжимаемой толщи при двух вариантах учета порового давления приведен на рис. 3.

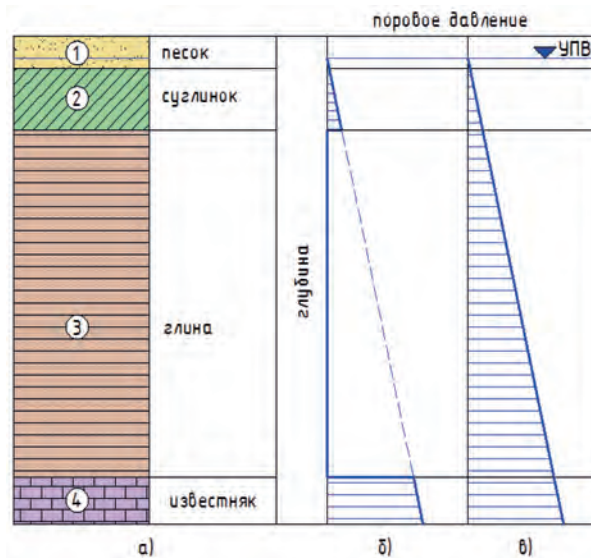


Рис. 2. Эпюры распределения порового давления по глубине: а – геологическая колонка; б – эпюра без учета порового давления в СФГ; в – эпюра с учетом порового давления в СФГ

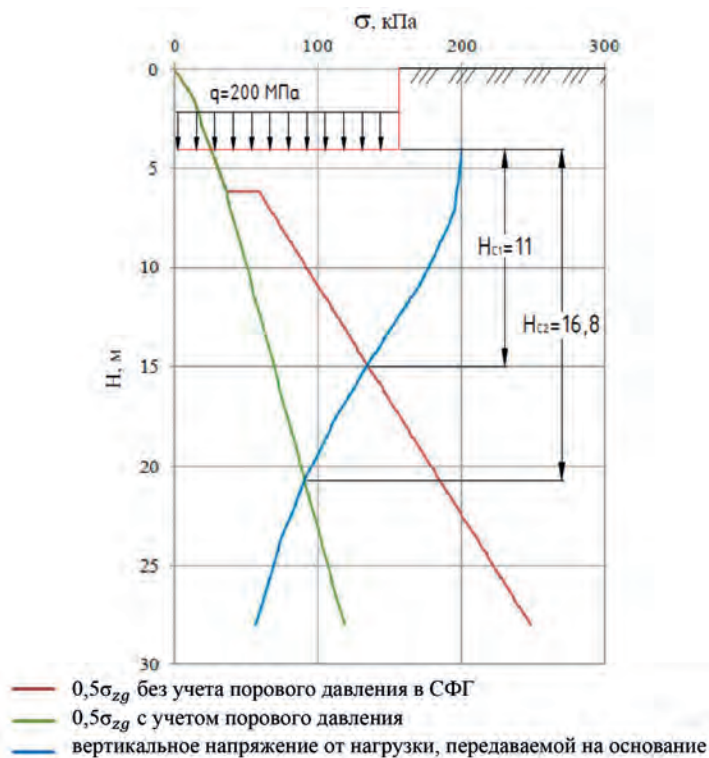


Рис. 3. График определения нижней границы сжимаемой толщи в слое СФГ с учетом и без учета порового давления

Результаты определения нижней границы сжимаемой толщи под фундаментом условного здания для двух вариантов учета порового давления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Размеры сжимающей толщи

| № | Способ учета порового давления | Величина сжимаемой толщи, м | Относит. разница, % |
|---|--------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1 | Без учета                      | $H_{c1} = 11$               | 53                  |
| 2 | С учетом                       | $H_{c2} = 16,8$             |                     |

График и таблица наглядно демонстрируют существенную разницу в размерах сжимающей толщи в зависимости от способа определения порового давления.

Из табл. 2 следует, что в условиях рассматриваемой задачи при учете порового давления в слое СФГ размер сжимаемой толщи возрастает в 1,5 раза. Увеличение размеров сжимаемой толщи, в свою очередь, приведет к увеличению расчетной осадки основания условного фундамента.

#### Определение модуля деформации грунта при двух вариантах учета порового давления

Как следует из формулы (1), поровое давления играет определяющую роль при определении эффективных напряжений. В то же время величина природного эффективного напряжения используется при определении модуля деформации.

Эталонным методом определения модуля деформации в нашей стране является штамповый модуль, наиболее близко отражающий реальную работу грунта в основании сооружений. Штамповый модуль используется в качестве нормативного значения при расчете осадки фундамента методом послойного суммирования.

На рис. 4 дан условный график зависимости осадки от нагрузки, обычно получаемый при штамповых испытаниях.

В соответствии с требованиями ГОСТ 20276-2012 [13] величина природного вертикального эффективного напряжения является начальной точкой диапазона эффективных напряжений, по которому определяется модуль деформации грунта. На рис. 4 символами  $\sigma'_{01}$  и  $\sigma'_{02}$  обозначены значения природного порового давления, полученного с учетом и без учета порового давления соответственно.



Рис. 4. График штамповых испытаний

Расчет модуля деформации грунта  $E$  вычисляют по формуле

$$E = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot D \frac{\Delta\sigma'}{\Delta S}, \quad (2)$$

где  $\nu$  – коэффициент поперечного расширения (Пуассона);  $K_p$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от заглубления штампа  $h/D$  ( $h$  – глубина расположения штампа относительно дневной поверхности грунта, см;  $D$  – диаметр штампа, см);  $K_1$  – коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79;  $\Delta\sigma'$  – приращение давления на штамп, МПа;  $\Delta S$  – приращение осадки штампа, соответствующее  $\Delta\sigma'$ , см.

Поскольку модуль деформации напрямую зависит от тангенса угла наклона осредняющей прямой, определяемой отношением  $\Delta\sigma'/\Delta S$ , из рис. 4 следует, что величина модуля, определенная без учета порового давления, будет значительно ниже.

Оценим влияние модуля деформации, определенного с учетом и без учета порового давления применительно к слою СФГ основания условного здания, приведенного на рис. 1.

Определение модуля проводилось по результатам реальных испытаний, с графическими построениями, аналогичными представленным на рис. 4. Вертикальные эффективные напряжения с учетом порового давления –  $\sigma'_{01}$ , и без учета –  $\sigma'_{02}$ , рассчитывались для глубины, соответствующей середине слоя СФГ. Полученные значения эффективных напряжений представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Значения вертикальных эффективных напряжений  
и штампового модуля деформации  
при двух вариантах учета порового давления в СФГ**

| Способ учета порового давления в СФГ | Вертикальное эффективное напряжение, кПа | Модуль деформации, МПа |
|--------------------------------------|--|------------------------|
| Без учета                            | 201                                      | 21,6                   |
| С учетом                             | 104                                      | 34,9                   |

Здесь же приведены значения штампового модуля, полученные для разных вариантов учета порового давления.

Как видим, штамповый модуль, полученный с учетом порового давления в СФГ оказался в 1,6 раза выше. Увеличение модуля деформации будет способствовать снижению расчетной осадки основания условного фундамента.

**Расчет осадки условного фундамента методом послойного суммирования для двух вариантов учета порового давления**

Расчет осадки основания фундамента выполним в соответствии с требованиями п. 5.6.31 СП 22.13330.2016 [11]. При этом распределение вертикальных напряжений по глубине основания примем в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.

Для определения глубины сжимаемой толщи воспользуемся данными табл. 2, а в качестве расчетного значения модуля деформации слоя СФГ используем данные табл. 3.

Результаты выполненных расчетов представлены в табл. 4

Таблица 4

**Значения осадок основания фундамента условного объекта,  
определенные методом послойного суммирования**

| Способ учета порового давления в СФГ | Осадка, мм | Относительная разница, % |
|--------------------------------------|------------|--------------------------|
| Без учета                            | 62,1       | - 5                      |
| С учетом                             | 57,2       |                          |

Как видим, расчетные осадки основания фундамента условного здания, определенные с учетом и без учета порового давления, оказались довольно близкими. Относительная разница составила всего 5%. Это свидетельствует о том, что увеличение расчетной осадки за счет роста сжимаемой зоны при учете порового давления, с избытком компенсировалось более высоким значением модуля деформации, определенным с учетом порового давления.

**Расчет осадки условного фундамента методом конечных элементов для двух вариантов учета порового давления**

Рассмотрим влияние способа учета порового давления на величину осадки основания условного фундамента при расчете методом конечных элементов (МКЭ).

Для расчета осадки численным методом были приняты физико-механические характеристики грунтов, представленные в табл. 1. Параметры модели принимались по рекомендациям разработчиков программы HS (Hardening soil) [15] и с учетом результатов статистического анализа грунтов Московского региона, приведенного в работе А. Ю. Мирного [16].

Размер сжимаемой толщи для двух вариантов учета порового давления принимался в соответствии с табл. 2.

В отличие от метода послойного суммирования, современные модели грунтов, в частности, используемая нами модель HS, позволяют проводить расчеты с учетом истории формирования грунтов, что повышает надежность определения их природного напряженного состояния и прогноза осадок фундаментов. Для этого необходимо знать параметры переуплотнения грунта, в частности, коэффициент переуплотнения OCR.

В соответствии с ГОСТ Р 58326-2018 [14] коэффициент переуплотнения определяется из выражения

$$OCR = \sigma'_c / \sigma'_o, \quad (3)$$

где  $\sigma'_o$  – вертикальное эффективное напряжение от собственного веса грунта;  $\sigma'_c$  – напряжение переуплотнения.

Как следует из приведенного выражения, коэффициент переуплотнения напрямую зависит от величины природного эффективного напряжения, а значит, как указывалось ранее, и от величины порового давления.

На рис. 5 представлен график зависимости коэффициента переуплотнения OCR от глубины в пределах слоя СФГ (ИГЭ-3) при разных способах учета порового давления.

Как следует из графика, значения коэффициента переуплотнения в пределах слоя СФГ уменьшаются с глубиной по гиперболической кривой, причем значения OCR при учете порового давления в 1,5 - 2 раза выше, чем без его учета.



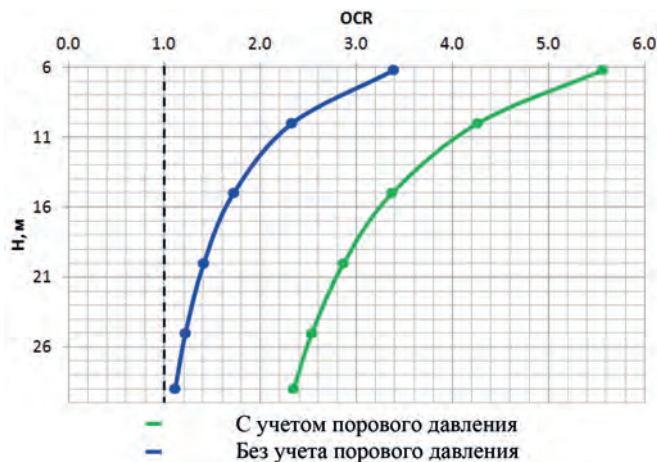


Рис. 5. График зависимости коэффициента переуплотнения  $OCR$  от глубины в пределах слоя СФГ при разных способах учета порового давления

Максимальные значения расчетной осадки фундамента условного здания, рассчитанные методом конечных элементов по модели HS без учета и с учетом порового давления, представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Значения максимальной расчетной осадки при двух вариантах учета порового давления в СФГ, определенных численным методом**

| Способ учета порового давления | Максимальная осадка, мм | Относительная разница, % |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Без учета                      | 28,7                    | 20                       |
| С учетом                       | 34,5                    |                          |

Как следует из табл. 5, величина максимальной расчетной осадки основания, определенная численным методом с учетом порового давления, оказалась выше на 20%. Относительно небольшая разница в данном случае объясняется тем, что рост сжимаемой зоны, связанный с учетом порового давления, направленный на увеличение осадки, компенсировался ростом коэффициента переуплотнения, направленного на ее снижение.

### Выводы

1. Внесение в действующие нормативные документы изменений, связанных с учетом порового давления в слоях СФГ, является необходимым отражением объективной реальности, подтвержденной большим объемом экспериментальных данных.

2. Учет порового давления в СФГ оказывает разнонаправленное влияние на расчетные параметры для определения осадки основания фундамента.

3. При деформационных расчетах оснований методом послойного суммирования учет порового давления оказывает влияние на определение размеров сжимаемой толщи и значение модуля деформации. При этом увеличение размеров сжимаемой толщи повышает величину расчетной осадки, а увеличение модуля деформации ее снижает.

4. При деформационных расчетах оснований численным методом с использованием модели HS учет порового давления оказывает влияние на определение размеров сжимаемой толщи и параметров переуплотнения грунта. При этом увеличение размеров сжимаемой толщи приводит к увеличению расчетной осадки, а увеличение коэффициента переуплотнения – к ее снижению.

5. Действие разнонаправленных факторов для двух расчетных методов с учетом порового давления оказывает взаимокомпенсирующее влияние на результаты расчета осадки основания. Для рассмотренного в статье примера разница в осадках оказалась не более 20%. Вместе с тем нельзя исключать условия, при которых эта разница может оказаться гораздо существеннее.

6. Учет порового давления в слоях СФГ необходимо проводить комплексно, как на этапе изысканий – при определении характеристик грунтов, так и на этапе геотехнических расчетов – при определении размеров сжимаемой толщи. Выборочный подход к учету порового давления может привести к серьезным ошибкам при расчете осадок оснований фундаментов.

7. Учет порового давления в слоях СФГ позволяет лучше отразить реальное состояние и поведение грунтов в основаниях сооружений, что, в конечном счете, повышает достоверность геотехнических прогнозов и безопасность строительства.

### Послесловие

Основной задачей статьи являлась качественная оценка влияния различных факторов на определение расчетной осадки оснований СФГ в зависимости от способа учета порового давления. Этим объясняется отсутствие строгого похода к идентичности исходных данных для расчетов методом послойного суммирования и МКЭ (модель HS) и прямого сопоставления результатов расчета осадок, полученных двумя расчетными методами.

### Библиографический список

1. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения. – М.: Стройиздат, 1948.
2. Механика грунтов, основания и фундаменты / Е.И. Медков, В.Г. Березенцев, М.Н. Гольдштейн, А.А. Царьков. – М.: Транспорт, 1970.
3. Далматов Б.И. Механика грунтов. Ч. 1. Основы геотехники. М.: Изд-во АСВ; СПб.: С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2000.
4. Болдырев Г.Г., Малышев М.В. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах). – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2009.
5. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. – М.: Изд-во АСВ, 2009.
6. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. – М.: Госстройиздат, 1958.
7. Briaud J.-L. Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. John Wiley and Sons, Inc., 2013.
8. Fellenius B.H. Basics of foundation design URL: <https://ru.scribd.com/document/259265396/Basics-of-FoundationDesign-Fellenius>.
9. Vogt S.R.K. Vorträge Lehrstuhl für Grundbau. Bodenmechanik. Felsmechanik und Tunnelbau. Zentrum Geotechnik. URL: <https://www.bgu.tum.de>.

10. Труфанов А.Н. Поровое давление в водоупорных слоях грунтов / Материалы XV Общерос. научно-практ. конф. «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 26 – 29 ноября 2019 г. URL: <http://www.geomark.ru/wp-content/uploads/2019/04/Materialy-XV-konf-2019.pdf>, с. 57-73.

11. СП 22.13330.2016 СНиП 2.02.01-83\* Основания зданий и сооружений.

12. Труфанов А.Н. Использование метода линейной интерполяции для определения параметров природного напряженного состояния слабо фильтрующих грунтов // Вестник НИЦ «Строительство», 2020. №3 (26). С 93-104.

13. ГОСТ 20276-2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.

14. ГОСТ Р 58326-2018 Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения.

15. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The hardening soil model: formulation and verification // Proc. of the Int. Plaxis Symp. 'Beyond 2000 in computational geotechnics'. Rotterdam: Balkema, 1999. P. 281–296.

16. Мирный А.Ю. Статистический анализ параметров модели Hardening soil для грунтов Московского региона // Геотехника, 2017, №4. С. 54-60.

## Автор

Александр Николаевич ТРУФАНОВ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией методов исследования грунтов НИИОСП им. Н. М. Герсеванова 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