



# ВЗВЕШИВАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ВОДЫ В ВОДОУПОРНОМ СЛОЕ

## EFFECT OF BUOYANCY FORCE OF WATER IN AN IMPERVIOUS STRATUM

**ТРУФАНОВ А.Н.**

*Заведующий лабораторией методов исследования грунтов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, rtt2004@rambler.ru*

**РОСТОВЦЕВ А.В.**

*Ведущий научный сотрудник лаборатории методов исследования грунтов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, rtt2004@rambler.ru*

**TRUFANOV A.N.**

*The head of the laboratory of the methods of soil exploration of the Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP)*

**ROSTOVTSSEV A.V.**

*The leading scientist of the laboratory of the methods of soil exploration of the Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP)*

### **Ключевые слова:**

*взвешивающее действие воды; водоупорный слой; эффективное напряжение; поровое давление; бытовое давление.*

### **Key words:**

*effect of buoyancy force of water; impervious stratum; effective stress; pore pressure; natural pressure.*

### **Аннотация**

**В статье содержится критика точки зрения, исключающей взвешивающее действие воды в водоупорном слое. Взвешивающее действие воды рассматривается как частный случай принципа эффективных напряжений Терцаги. Приводятся аргументы, свидетельствующие о появлении свободной воды и порового давления в грунтах водоупорных слоев при определенном уровне обжатия всесторонним давлением. Подтверждается действие в этих грунтах принципа эффективных напряжений. Делаются предложения по учету порового давления в слабофильтрующих грунтах при проектировании и расчете фундаментов.**

В механике грунтов под «взвешивающим действием воды» в грунтах понимается снижение нагрузки от веса вышележащих слоев грунта за счет выталкивающей силы воды, действующей на скелет грунта в соответствии с законом Архимеда.

По принципу эффективных напряжений Терцаги [7] эффективное напряжение в скелете грунта  $\sigma'$  определяется разницей между полным давлением на грунт  $\sigma$  и давлением в поровой воде  $u$  в соответствии с выражением  $\sigma' = \sigma - u$ . С учетом названного принципа «взвешивающее действие» воды в грунтах означает снижение эффективного напряжения в скелете грунта  $\sigma'$  за счет противодействия в поровой жидкости  $u$ , распределенного по глубине по линейному гидростатическому закону в соответствии с выражением  $u = \gamma_w h$  (где  $\gamma_w$  — удельный вес воды;  $h$  — высота столба воды от уровня грунтовых вод). Давление в поровой воде грунтов на различных глубинах не всегда совпадает с расчетным весом столба жидкости от уровня грунтовых вод до соответствующей точки, поэтому взвешивающее действие воды в грунтах можно рассматривать как частный случай принципа эффективных напряжений Терцаги.

Среди специалистов в области механики грунтов существует точка зрения об отсутствии взвешивающего действия воды в так называемых водоупорных слоях и под ними. К сожалению, данное мнение нашло отражение и в некоторых нормативных документах. Так, в п. 5.5.40 СП 50-101-2004 [4] записано: «...При определении  $\sigma_{zg}$  (вертикального давления от собственного веса грунта, расположенного на глубине  $z$ ) в водоупорном слое и ниже него следует учитывать давление столба воды, расположенного выше водоупорного слоя». Под «водоупорным слоем» здесь по умолчанию понимается слой глинистого грунта, в котором отсутствует взвешивающее действие воды. По существу, в таких грунтах отрицается действие принципа эффек-

### **Abstract**

**The article criticizes the point of view that excludes the effect of buoyancy force of water in an impervious stratum. The effect of buoyancy force of water is considered as a particular case of Terzaghi's principle of effective stresses. The paper presents some arguments that evidence arising free water and pore pressure in impervious stratum soils at a certain compression level of uniform pressure, confirms the effect of the principle of effective stresses in the soils, makes some proposals to take into account pore pressure in poor filtering soils for designing and calculating foundations.**



Рис. 1. Поперечный разрез образца вендской глины

тивных напряжений Терцаги. Из приведенной выше выдержки следует, что поровое давление в грунтах водоупорных слоев и под ними отсутствует, а давление от веса вышележащих слоев полностью передается на скелет. Это означает, что полные и эффективные напряжения в грунтах водоупорных слоев и под ними равны. По существу, грунт водоупорного слоя предлагается рассматривать как сплошное однофазное тело, подчиняющееся законам механики сплошной среды (в этом случае по логике и грунты под этим слоем необходимо рассматривать как сплошную однофазную среду).

Надо отметить, что, несмотря на то что в действующие нормативные документы введен термин «водоупорный слой», его определение там отсутствует. Это говорит о дискуссионности приведенного выше положения из СП 50-101-2004 [4]. Действительно, неясно, какой глинистый грунт следует считать водоупорным. Четкого критерия перехода фильтрующего грунта в нефилтрующий, двухфазной (или трехфазной) среды в однофазную на сегодняшний день не предложено. В связи с отсутствием соответствующего определения термина «водоупорный слой» непонятно, как использовать упомянутое положение СП [4] (с другой стороны, это дает возможность проектировщикам уклоняться от применения данного требования на практике).

Исключая взвешивающее действие воды в водоупорных горизонтах, необходимо ответить на следующие вопросы.

1) Каковы критерии, по которым грунт можно отнести к «водоупорному слою»?

2) Как быть с ГОСТами, разработанными в соответствии с принципом эффективных напряжений Терцаги и учитывающими давление в поровой воде и эффективные напряжения в скелете грунта? (В сплошной однофазной среде это разделение отсутствует, все виды консолидированных и дренированных испытаний для грунта водоупорного слоя становятся непригодными).

3) Как определить диапазоны нагрузок при проведении лабораторных испытаний и определении искомых параметров? (Без учета взвешивающего действия (порового давления) в водоупорном слое и под ним мы можем существенно переуплотнить грунт на этапе восстановления бытового давления при трехосных испытаниях и существенно завязать значения модуля деформации при неправильно выбранном диапазоне давлений).

4) Как рассчитывать бытовые давления для оценки напряженного состояния массива грунта под основанием сооружения, необходимые для расчета осадок и несущей способности основания?

5) Можно ли использовать законы механики грунтов (в частности, закон фильтрационной консолидации) для водоупорных слоев, где процесс фильтрации, по определению, отсутствует?

Изложим свои соображения по данному вопросу на примере исследования вендских отложений на строительной площадке общественно-делового центра «Охта» в г. Санкт-Петербурге. Грунты представлены здесь твердыми слоистыми суглинками (рис. 1) со средними значениями характеристик: плотности —  $2,22 \text{ г/см}^3$ ; влажности —  $13,9\%$ ; пористости —  $39,7\%$ ; числом пластичности —  $0,11$ . Данные грунты можно рассматривать как типичный водоупорный слой. Глубина их исследуемой толщи в пределах предполагаемой активной (от воздействия сооружения) зоны составила от 40 до 130 м.

Ниже представлены некоторые результаты испытаний, позволяющие усомниться в справедливости предложения рассматривать грунты водоупорного слоя как однофазное сплошное тело.

### **1. В процессе проведения трехосных недренированных испытаний на этапе восстановления фазового состава фиксировалось изменение порового давления.**

На рисунке 2 представлен график изменения порового давления в вендском суглинке в процессе обжатия образца всесторонним давлением на этапе восстановления фазового состава по методу ВФС [5].

Как видим, с ростом полного всестороннего давления на образец происходит и постепенное возрастание порового давления. Это противоречит положению об однофазном состоянии грунта в водоупорном слое. Действительно, измерение порового давления возможно только при двух-трехфазном состоянии грунта, т.е. при наличии жидкости, выдавливаемой из образца грунта через капилляры пористого камня и передающей давление на измерительное устройство.

Следует отметить, что появление порового давления отмечалось не сразу, а после достижения в камере определенного уровня давления всестороннего обжатия. Можно предположить, что при более низких значениях этого давления поровая вода находится в связанном или переходном состоянии (по классификации 2005 г. [1])

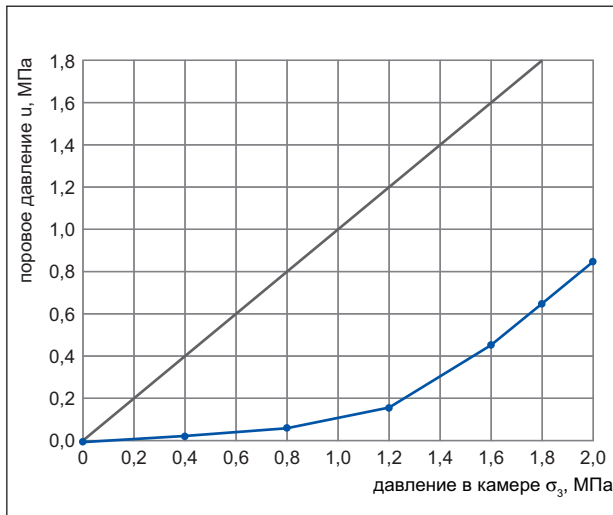


Рис. 2. График зависимости порового давления  $u$  от полного всестороннего давления  $\sigma$  при восстановлении фазового состава вендского суглинка

и лишь при достижении определенного уровня напряжения в контактной зоне между частицами грунта наименее связанная вода переходит в свободное состояние. На возможность отжатия воды переходного типа при определенном уровне давления указывал в свое время академик Е.М. Сергеев [2]. Он отмечал, что «рыхло связанная вода (соответствует воде «переходного состояния» по классификации 2005 г. [1]) удерживается вокруг грунтовых частиц со значительно меньшей силой, чем адсорбированная вода, молекулы ее имеют большую свободу движения», в то время как отжатие связанной воды («прочно связанной» по классификации 1983 г. [3]) может происходить при давлениях 20–50 МПа.

## 2. В процессе проведения трехосных испытаний при всестороннем обжатии грунта под противодействие происходило отжатие поровой жидкости.

При трехосных испытаниях давление в камере поднималось от уровня полного бытового давления, а дренаж осуществлялся под противодействие, равное давлению столба воды на глубине залегания образца. В таких условиях процесс фильтрационной консолидации протекал нормально, с отжатием поровой жидкости (!). Таким образом, как минимум часть поровой жидкости, соответствующая отжатому объему воды, переходила в свободное состояние.

Следует отметить, что при испытаниях в компрессионных приборах дренаж поровой воды осуществлялся под атмосферное давление без противодействия. При аналогичных с трехосными испытаниями уровнях обжимающих давлений деформации образцов были на порядок ниже, чем при трехосных испытаниях с противодействием. Скорость фильтрационной консолидации в таких условиях была пренебрежимо мала и сопоставима с погрешностями системы измерений (результаты были забракованы).

Отсутствие фильтрационных процессов в компрессионных приборах с дренажом под атмосферное давление и их наличие в трехосных испытаниях с дренажом под противодействие, по-видимому, связано с наличием при компрессионных испытаниях в образце третьей, газовой фазы в виде заземленных в поровом пространстве пузырьков, препятствующих процессам фильтрационной консолидации. Наличие газовой фазы в образце объясняется изменением напряженно-деформированного состояния монолита в результате его извлечения на поверхность в процессе пробоотбора [6]. При трехосных испытаниях под действием противодействия выделившийся газ снова переходил в растворенное состояние и процесс консолидации протекал нормально. Это еще раз подтверждает ошибочность представления о слабофильтрующем «водоупорном» слое как однофазном сплошном теле.

Доводом в пользу наличия взвешивающего действия воды в грунтах можно считать и результаты исследования грунтов донных отложений континентального шельфа. Предположим, что глубина океана в точке исследования составляет 980 м, а глубина по грунту — 20 м (рис. 3). При этом над рассматриваемой точкой залегает водоупорный слой. Если взвешивающее действие воды в рассматриваемой точке отсутствует, то в соответствии с СП 50-101-2004 [4] на скелет грунта должно действовать давление от вышележащего столба жидкости, равное 100 МПа, не считая веса скелета вышележащего грунта. Трудно себе представить грунт, скелет которого обжат таким давлением. На практике ничего подобного не происходит. Грунты донных отложений при прочих равных условиях, как правило,

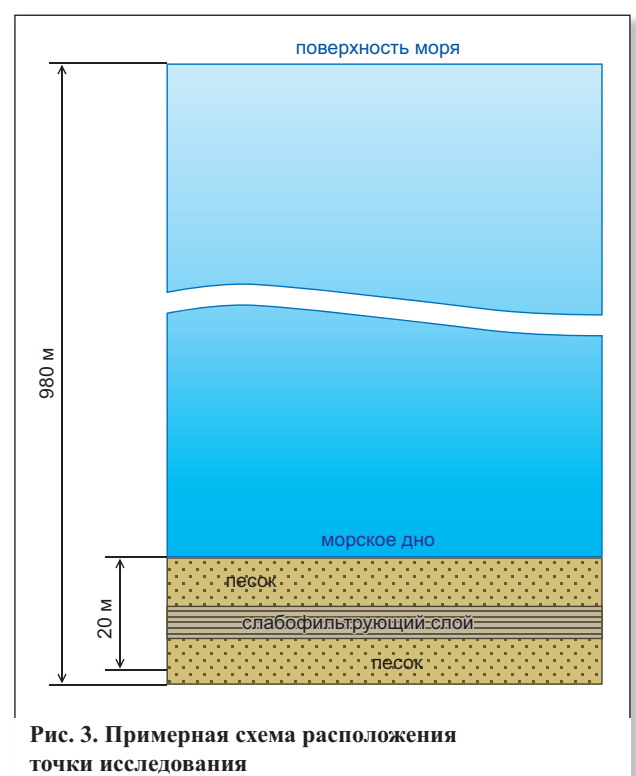


Рис. 3. Примерная схема расположения точки исследования



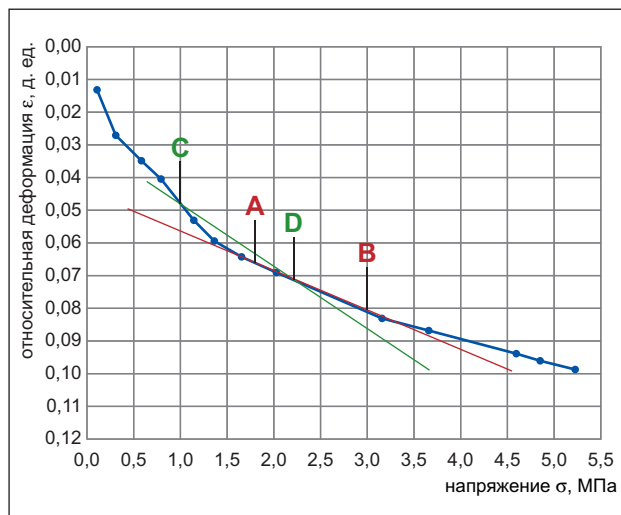


Рис. 4. График компрессионного испытания образца грунта

являются менее плотными, чем грунты суши. Это объясняется незавершенностью процессов их литификации.

Приведем еще один довод в пользу наличия порового давления под водоупорным слоем. Предположим, что водоупорный слой, имеющийся в данной точке, на некотором расстоянии от нее выклинивается, т.е. появляется прямая гидравлическая связь поровой воды нижележащего грунта с поровой водой верхних горизонтов. Очевидно, что в этом случае наличие взвешивающего действия воды уже ни у кого не должно вызывать сомнений.

С точки зрения авторов, введение понятия «водоупорный слой» является весьма условным. По существу, это глинистые грунты, обладающие низкими фильтрационными способностями. В связи с этим исключение взвешивающего действия воды в так называемых «водоупорных слоях» в СП 50-101-2004 [4], по мнению авторов, является как минимум не подготовленным соответствующей нормативной базой, а как максимум — неоправданным.

Рассмотрим вопрос влияния учета взвешивающего действия воды на результаты компрессионных испытаний на примере тех же вендских суглинков. На рисунке 4 представлен график компрессионного испытания образца грунта, извлеченного с глубины 81 м, при уровне грунтовых вод 3 м. При средней плотности вышележащего грунта  $2,17 \text{ г/см}^3$  величина полного вертикального бытового давления составит 1,8 МПа. Если принять линейное распределение величины порового давления по глубине, т.е. учесть взвешивающее действие воды, эффективное вертикальное бытовое давление составит 1,0 МПа. При дополнительной строительной нагрузке величиной в 1,2 МПа диапазоны давлений для определения модуля деформации составят: (1) 1,8–3,0 МПа — без учета взвешивающего действия; (2) 1,0–2,2 МПа — с учетом взвешивающего действия. На графике компрессионной кривой (см. рис. 4) первому диапазону соответствует участок АВ, второму — CD.

Полученные для данных диапазонов давлений компрессионные модули составят: (1) 32 МПа — без учета взвешивающего действия; (2) 55 МПа — с учетом взвешивающего действия. При сравнении этих значений видно, что отсутствие учета порового давления (взвешивающего действия) в водоупорном слое привело к завышению значения модуля деформации на 72%. Легко представить, к каким последствиям на практике может привести подобная переоценка деформационных характеристик грунтов.

Подводя итог изложенному выше, авторы рекомендуют:

1) исключить из нормативных документов термин «водоупорный слой»;

2) исключить из нормативных документов термин «взвешивающее действие воды», а напряжение от веса грунта определять в соответствии с принципом эффективных напряжений Терзаги — как разницу между полным и поровым давлением в рассматриваемой точке.

Вместе с тем достоверное определение порового давления в слабофильтрующих глинистых горизонтах вызывает большие трудности. В связи с этим для таких грунтов предлагается принимать промежуточные значения порового давления, измеренные над и под ними. При этом рекомендуется принимать распределение порового давления внутри горизонта по линейному закону.

При полном отсутствии замеров порового давления в грунтах по глубине рекомендуется ориентировочно его оценивать в соответствии с линейным распределением по гидростатическому закону.

Изложенные выше предложения авторы рекомендовали учесть при подготовке нового издания СНиП 2.02.01-83\* «Основания зданий и сооружений». При подготовке настоящей публикации стало известно, что они были учтены в новой редакции данного документа. ☺

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 137–143.
2. Сергеев Е.М. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ. С. 168–169.
3. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 51–61.
4. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений (п. 5.5.40). М.: Госстрой России, 2004. С. 25.
5. Труфанов А.Н., Мариупольский Л.Г., Пчелина И.В. Способ трехосных испытаний грунтов, преимущественно донных / А.с. № 1231134. Б.и. № 18. 1986.
6. Труфанов А.Н., Беллендир Е.Н. Моделирование процесса пробоотбора для глубоко залегающих грунтов суши // Труды международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов». М., 2010. Т. 5. С. 1905–1910.
7. Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G. Soil mechanics in engineering practice. 3d edition. New York: John Wiley and Sons, 1996. С. 83–84.