

**Хачатрян В.А.** ©

Магистрант, Кафедра "Строительство уникальных зданий и сооружений",  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## **КАЧЕСТВО ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ И ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ**

### *Аннотация*

*В статье рассматриваются вопросы повышения качества в определении и уточнении инженерно-геологических и гидрогеологических условий, как на стадии проектирования, так и при строительстве и эксплуатации. Данные о глубинных деформациях позволяют повысить надежность оценки фактического характера деформирования прилегающего к сооружениям массива грунта в начальный период их развития.*

**Ключевые слова:** инженерно-геологические изыскания, деформация грунта, геотехнический расчет, подземное пространство.

**Keywords:** geological-engineering survey, ground deformation, geotechnical calculation, underground space.

### **Введение**

Оценка инженерно-геологических условий при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений имеет ряд особенностей, которые не в полной мере отражены в действующих нормативных документах [1, 2,3]. К таким особенностям относится оценка:

- состояния массива грунта, являющегося основанием для размещения подземного сооружения;
- свойств грунтов с учетом их физического и напряженного состояния (естественного и при взаимодействии с сооружениями);
- гидрогеологических условий и степени обводненности;
- прогноза возникновения и развития геологических явлений с учетом влияния подземных вод и т.д.

Известно, что обоснование проектных решений, в том числе для подземных сооружений, производится на основании результатов инженерно-геологических изысканий [2,4,5].

Буровые работы проводятся в зоне размещения или по трассам проектируемых сооружений. Глубина скважин определяется необходимостью освещения геологического разреза, структуры грунта и свойств на глубину не менее 8-10 м. ниже заложения фундамента. При бурении ведутся гидрогеологические наблюдения за уровнями подземных вод и их температурой. Отбираются пробы ненарушенного и нарушенного сложения для лабораторных исследований [6,7,8]. Также при откачках и стационарных наблюдениях отбираются пробы воды на химический анализ.

Лабораторные работы проводятся по пробам грунтов, воды и воздуха. При этом выполняются следующие виды испытаний:

- определение физико-механических свойств грунтов;
- стандартный анализ воды;
- определение CO<sub>2</sub> агрессивной и коррозионной активности подземных вод;
- определение коррозионной агрессивности грунтов к бетону, стали, оболочкам кабеля;

- анализ газового состава почвенного воздуха.

Показатели физико-механических свойств грунтов оцениваются по результатам статистической обработки лабораторных данных, на основе которых приводятся следующие характеристики:

- для четвертичных отложений – гранулометрический состав (несвязные грунты), плотность, пористость, влажность, консистенция, модуль общей деформации, пластичность, угол внутреннего трения и сцепление;

- для коренных пород – плотность, прочность на сжатие в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии, динамический и статический модули упругости, модуль общей деформации, истинный и кажущийся угол внутреннего трения, сцепление, коэффициент Пуассона, коэффициент упругого отпора, сейсмическая жесткость и резонансные свойства.

### **Основная часть**

Модуль деформации грунта в инженерных расчетах в отечественной практике принимается по результатам компрессионных испытаний и корректируется путем сравнения со штамповыми опытами [9,10,11]. В результате такой корректировки понятие «модуль деформации» превращается в весьма условную величину. Тем не менее, практика расчетов осадок зданий с применением таких условных модулей показывает, что порядок ожидаемой осадки оценить действительно удастся. Сравнение расчетных и наблюдаемых осадков показывает, что точность расчета осадок методом послойного суммирования составляет 30-40%. Без применения корректирующих множителей результаты расчетов имели бы существенно большие различия с действительностью. Однако физический смысл понятия «модуль деформации» в результате такой корректировки практически теряется. В результате, условно, можно сформулировать, что модуль деформации является величиной, обеспечивающей определенную достоверность метода послойного суммирования для рядовых зданий высотой до 16 этажей, для которых наработан большой опыт строительства.

Традиционно для расчета деформаций основания как в России, так и за рубежом, используются так называемые инженерные методы расчета осадок. Все эти методы так или иначе основаны на линейной теории упругости, основным (и единственным) параметром работы грунта в этих методах является модуль деформации. Эти методы, в силу заложенных в них условных допущений, позволяют оценить только порядок ожидаемой осадки здания [12,13,14]. Такая точность для современного уровня расчетов, очевидно, является недостаточной.

Одним из существенных недостатков методов, основанных на линейной теории упругости, является необходимость условного ограничения сжимаемой толщи. Эмпирические правила ограничения сжимаемой толщи, например, не позволяют корректно решить задачу взаимного влияния свайного и плитного фундаментов, поскольку глубина сжимаемой толщи для этих фундаментов различна. Вторым существенным недостатком инженерных методов расчета осадок является существенная условность понятия «модуль деформации».

В современных условиях строительства инженеру-геотехнику приходится решать нетрадиционные задачи [15,16,17], например, при строительстве высотных зданий с достаточно большими нагрузками на основание, при расчете деформаций подпорных сооружений и др. В этих условиях совершенно неизвестно, насколько достоверным будет применение традиционно определяемого модуля деформации и эмпирических правил ограничения зоны деформаций. Скорее всего, точность таких расчетов будет крайне низкой.

Между тем путь улучшения точности геотехнических прогнозов вполне очевиден. Даже наиболее простая с математической точки зрения линейно упругая среда характеризуется, как минимум, *двумя* параметрами деформируемости. Это могут быть модуль Юнга и коэффициент Пуассона, или же (что более удобно для рассмотрения физических особенностей различных сред) объемный модуль и модуль сдвига. Очевидно, что применение только одного параметра в расчетах не способно привести к желаемой точности даже для простейшей среды. Таким образом, использование в качестве параметра

деформируемости грунта только одного модуля деформации является не совсем корректным, что требует доработки в практике проектирования.

Грунт должен характеризоваться, как минимум *двумя нелинейными зависимостями*, определяющими его работу при объемном сжатии и сдвиге. Только комплекс этих кривых (а не какая-нибудь одна из них) может дать понятие о поведении грунта при деформировании.

Рассмотрим стандартные эксперименты, выполняемые при инженерно-геологических изысканиях.

**Компрессионное сжатие.** В этом эксперименте определяющее значение играет уплотнение грунта. Деформации формоизменения имеют место (образец становится тоньше, а, стало быть, меняет свою форму), однако они имеют подчиненное значение, поскольку не могут происходить без деформаций уплотнения. Более чистым экспериментом является всесторонняя компрессия в трехосном приборе, поскольку в этом случае имеют место только деформации уплотнения.

**Трехосное сжатие.** При выполнении эксперимента по недренированной схеме в полностью водонасыщенном образце объемные деформации произойти не могут и имеют место только деформации формоизменения.

**Штамповые испытания.** В этих испытаниях могут проявляться как деформации уплотнения, так и деформации формоизменения. Развитие первых обусловливается фильтрационными свойствами грунта, т.е. возможностью оттока воды из порового пространства за краткое время опыта. Деформации формоизменения могут развиваться более свободно.

Традиционные эксперименты показывают, что в них проявляются принципиально разные способы деформирования грунта. Описать различное поведение грунта с помощью единственной константы достаточно сложно. Сравнение компрессионного и штампового модулей не вполне корректно, поскольку в компрессионных условиях свободное развитие деформаций формоизменения исключено.

Рассмотрим роль деформаций формоизменения при нагружении штампа. Для простоты представим элементарную линейно-деформируемую среду. В этой среде осадка штампа определяется формулой Шлейхера (именно эта формула используется для определения штампового модуля):

$$s = \frac{Pr}{E}(1 - \mu^2),$$

где  $p$  - давление по площади штампа,  $r$  - его радиус,  $E$  и  $\mu$  - характеристики линейно деформируемой среды.

Здесь, как принято в теории упругости, участвуют две константы деформируемости среды – модуль деформации и коэффициент Пуассона. Выразим через них по общеизвестным зависимостям две другие упругие характеристики – объемный модуль и модуль сдвига:

$$K = \frac{E}{1 - 2\mu}, G = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

Для оценки вклада деформаций формоизменения в общую осадку штампа можно исключить из рассмотрения деформации уплотнения. Для этого представим объемно-несжимаемую среду с тем же значением модуля сдвига. В этом случае

$$K^* \rightarrow \infty, G^* = G, \quad \mu^* = 0.5, E^* = E \frac{1 + \mu^*}{1 + \mu}.$$

Подставляя новые значения упругих характеристик в формулу осадки, получим осадку штампа без учета деформаций уплотнения и сравним ее с исходной осадкой:

$$\frac{s^*}{s} = \frac{\frac{pr}{E^*}(1-\mu^{*2})}{\frac{pr}{E}(1-\mu^2)} = \frac{(1+\mu)(1-\mu^{*2})}{(1+\mu^*)(1-\mu^2)} = 0.5 \frac{1+\mu}{1-\mu^2}.$$

Расчеты показывают, что при коэффициенте Пуассона 0.3, более 70% составляющей части осадков, обусловлены деформациями формоизменений.

Приведенный пример показывает, что, при низкой точности имеющихся методов расчета осадков (30% - это обычная ошибка расчета), деформации уплотнения возможно в первом приближении не учитывать, а обратить наиболее пристальное внимание на поведение грунта при формоизменении.

В практике инженерно-геологических изысканий и традиционных расчетов наблюдается совершенно обратная тенденция [15,16]. Деформации уплотнения определяют (с теми или иными корректировками) по данным компрессионных испытаний. Деформациям же формоизменения вообще не уделяется внимание. В отечественной практике сравнительно редким является выполнение трехосных испытаний, которые только и могут дать информацию о поведении грунта при формоизменении. Чаще всего определяется прочность грунта в срезном приборе. Принципиальным недостатком этого опыта является то, что величина относительной деформации в нем неопределенна, поскольку неизвестна зона развития смещений в области сдвига. В результате мы имеем прочностные характеристики при сдвиге, но не имеем деформационных. В результате отсутствует какие-либо данные для оценки не менее 70% осадки штампа. В таких условиях трудно говорить о какой-либо точности геотехнических прогнозов.

При испытании песчаных грунтов, фильтрационная консолидация которых происходит достаточно быстро, заметную роль в них будет играть уплотнение песка под штампом. Напротив, в глинистых грунтах коэффициенты фильтрации ниже на несколько порядков, в результате чего за время испытания уплотнение грунта проявляется в весьма ограниченном объеме. Очевидно, существенную роль в штамповых испытаниях глинистых грунтов будут играть деформации формоизменения, особенно для слабых грунтов, прочность которых на сдвиг мала.

### **Выводы**

Таким образом, в водонасыщенных глинистых грунтах штамповый модуль деформации не имеет никакого отношения к компрессионному. Использование в практике проектирования модулей деформации грунта, приведенных к штамповым модулям, фактически означает, что в расчетах учитывается начальный модуль сдвига грунта (или модуль сдвига на стадии разгрузки-повторного нагружения). Тем самым в практике расчетов косвенным и неявным образом учитываются характеристики при деформациях формоизменения, которые играют существенную роль, естественно, не только в осадке штампа, но и в осадке зданий и сооружений.

Тогда принцип расчета деформаций основания может складываться из следующих положений:

- Деформации основания делятся на деформации уплотнения и деформации формоизменения.

- Работа грунта при деформациях уплотнения определяются по компрессионным испытаниям или при объемном сжатии в трехосном приборе.

- При расчете деформаций уплотнения следует учитывать возможность их развития за рассматриваемый период времени, путем решения задачи фильтрации при имеющихся поровых давлениях. Для этого необходимо определение фильтрационных свойств грунтов в лабораторных условиях.

- При расчете деформаций во времени необходимо также учитывать задержку во времени деформаций формоизменения, обусловленную вязкостью грунта.

Такой подход может быть основан исключительно на стандартных видах испытаний и не предполагает специальных, не включенных в нормы, исследований. Однако применение такого подхода может быть затруднено низким качеством имеющихся инженерно-геологических изысканий.

При этом изыскания должны охватывать всю зону предполагаемого деформирования грунтов. Только высокое качество инженерно-геологических изысканий может стать основой для повышения точности геотехнических прогнозов, принятия более надежных и в тоже время экономичных решений при конструировании зданий и сооружений.

### Литература

1. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Основные закономерности взаимодействия основания и надземных конструкций здания –СПб.: Реконструкция городов и геотехническое строительство, №10, 2006.
2. Лазарев Ю.Г., Новик А.Н., и др., Изыскания и проектирование транспортных сооружений /Ю.Г. Лазарев, А.Н. Новик, А.А. Шибко, В.Г. Терентьев, С.А. Сидоров, С.А. Уколов, В.А. Трепалин /Учебное пособие, СПб.: ВАТТ, 2008, 392 с.
3. Larsson R. Swedish Geotechnical Institute. Report No 59 Investigations and Load Tests in Clay Till. Results from a series of investigations and load tests in the test field at Tornhill outside Lund in southern Sweden.
4. Лазарев Ю.Г., Транспортная инфраструктура (Автомобильные дороги). Монография – LAP LAMBERT, Германия: 2015, 173 с.
5. Лазарев Ю.Г., Обоснование деформационных характеристик укрепленных материалов дорожной одежды на участках построечных дорог. / Ю.Г. Лазарев, П.А. Петухов, Е.Н. Зарецкая// Вестник гражданских инженеров. 2015. № 4 (51). С. 140-146.
6. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Упруго-вязко-пластическая модель структурно-неустойчивого глинистого основания. –СПб.: Реконструкция городов и геотехническое строительство № 9.
7. Улицкий В.М, Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Лучкин М.А. Расчет осадок зданий и сооружений на слабых глинистых грунтах с учетом развития деформаций сдвига во времени. –СПб.: Реконструкция городов и геотехническое строительство № 11.
8. Лазарев Ю.Г., Собко Г.И., Сущность процессов улучшения свойств грунтов на основе комплексного золоцементного вяжущего. – СПб.: Дорожная техника, № 1, 2014, С.26-28.
9. Богданов Е.Н., Богданов А.Е. Механические свойства грунтов как причина неточных решений механики грунтов. – Записки Горного Института. Санкт-Петербург, 2003, Том 153.
10. Lazarev Yu.G., Research of processes of improving soil properties based on complex ash cement binder / Yu.G. Lazarev, G. Sobko, M. Chakir // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vols. 584–586. Pp. 1681–1686.
11. Лазарев Ю.Г., Клековкина М.П., Строительство наружных сетей водопровода и канализации. – Учебное пособие, СПб.: СПбГАСУ, 2014. 105 с.
12. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1979.
13. Золотарь И.А., Собко Г.И., Лазарев Ю.Г., Прибор для определения коэффициента влагопроводности талых связных грунтов нарушенной структуры нестационарным методом. – Патент на полезную модель RUS 6627 21.04.1997.
14. Лазарев Ю. Г., Собко Г. И. Реконструкция автомобильных дорог: учебное пособие. СПб. СПбГАСУ. 2013. 93 с.
15. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. /Госстрой России. - М.: ПНИИИС Госстроя России, 2000.
16. Каширский В.И. Инженерно-геологические изыскания для строительства на урбанизированных территориях /Передовые технологии, оборудование и методы инженерно-геологических и геофизических изысканий и исследований при строительстве подземных сооружений. М., 2007.
17. Lazarev Yu.G., Effectiveness of Soil Reinforcement Based on Complex Ash-Cement Bonder Applied Mechanics and Materials / Yu.G. Lazarev, M. F. Chakir, E. N. Syhareva, Y. A. Ibraeva // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 725–726. Pp. 208–213.