

## Определение параметров переуплотнения



**Новая статья из цикла о лабораторных методах испытаний дисперсных грунтов посвящена методам определения параметров переуплотнения - состояния грунтов, при котором пористость не соответствует нагрузкам, действующим в настоящий момент. Рассмотрены два основных метода определения, а также общие принципы проведения испытаний на переуплотнение в приборах компрессионного сжатия.**

**Мирный Анатолий Юрьевич**

Старший научный сотрудник Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.т.н.

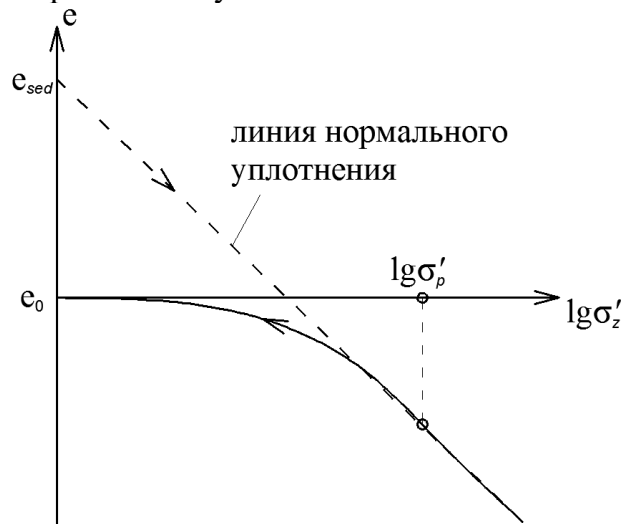
**Идрисов Илья Хамитович**

Генеральный директор ООО «НПП «Геотек», к.т.н.

Важной особенностью дисперсных грунтов естественного происхождения является способность «запоминать» историю нагружения. Это явление обусловлено физико-химическими свойствами грунтов и длительностью их существования при относительно постоянных условиях. Такая «память» грунта проявляется в первую очередь в особенностях его механического поведения, обусловленных переуплотнением.

Историю формирования дисперсного грунта из постепенно накапливающегося осадка можно проследить по зависимости коэффициента пористости от логарифма действующих

давлений. В начальный момент некоторый осадок имеет максимально возможный коэффициент пористости  $e_{sed}$ , называемый *седиментационным*. По мере накопления толщи осадка в рассматриваемой точке нагрузка будет расти, что на графике будет отражаться прямой линией – линией нормального уплотнения.



**Рис. 1.** Линия нормального уплотнения и формирование переуплотнения при разгрузке

Предположим, что накопление осадка остановилось при некотором достигнутом давлении  $\sigma'_p$ . В этом случае изменение пористости так же остановится. При этом контакты между отдельными частицами перестанут постоянно перемещаться, начнется их «старение»: помимо пленок связанной воды между частицами начнут появляться жесткие цементационные связи, а при продавливании пленок – непосредственные фазовые контакты между твердыми частицами. В результате из отдельных частиц, откладывавшихся в ходе седиментации, формируются микроагрегаты.

Теперь если нагрузка начнет снижаться (например, вследствие изменения базиса эрозии, выветривания или таяния ледника), то грунт уже не восстановит свою исходную, седиментационную пористость: во-первых, всем дисперсным средам присущи пластические деформации объема, а во-вторых разрыхлению будут препятствовать образовавшиеся между частицами скелета связи. Некоторое увеличение коэффициента пористости, тем не менее, будет наблюдаться в силу частичной упругой работы скелета, а также работы порового давления. Коэффициент пористости после разгрузки в этом случае примет значение  $e_0$ .

Возникшее состояние грунта называется *переуплотнением* – его коэффициент пористости не соответствует действующим бытовым давлениям и слишком низок. Очевидно, что могут быть выделены и *недоуплотненные* грунты, в которых коэффициент пористости, напротив, больше, чем был бы при нормальном уплотнении. Состояние недоуплотнения обычно возникает при избыточном поровом давлении в шельфовых отложениях. Положения теории переуплотнения одним из первых сформулировал А. Casagrande в 1936 году.

В результате переуплотнения в грунте формируется НДС, несоответствующее действующим в настоящий момент нагрузкам и характеризующееся в первую очередь высокими значениями горизонтальных напряжений. Вертикальные напряжения уменьшаются, но полной релаксации горизонтальных напряжений не происходит вследствие того, что обжатие носит повсеместный характер на большой площади. Также

полной релаксации горизонтальных напряжений препятствует трение в скелете грунта. В результате в основании сохраняется повышенное среднее напряжение, увеличивающее и жесткость, и сопротивление сдвигу. Учет данных давлений при расчетах позволяет существенно уточнить расчеты деформаций оснований и полнее использовать несущую способность.

Для описания переуплотнения используются два параметра – коэффициент переуплотнения  $OCR$  и давление предууплотнения  $POP$ . Оба они выражают соотношение между историческим давлением  $\sigma_p$  и действующим в настоящий момент  $\sigma_z$ .

$$OCR = \frac{\sigma_p'}{\sigma_z'} = \frac{\sigma_z' + POP}{\sigma_z'}$$

Применение того или иного параметра как фиксированной исходной величины в расчете меняет логику расчета напряжений от собственного веса и остается на усмотрение проектировщика. Для расчета величин параметров необходимо значение исторического давления  $\sigma_p'$ .

Определение исторического давления проводится в ходе специальных испытаний в компрессионных приборах на основании ГОСТ Р 58326-2018. Несмотря на изобилие методов, разработанных различными исследователями для определения параметров переуплотнения, в качестве основных и в отечественном стандарте, и в зарубежной практике используются два: метод Казагранде и метод Беккера. Эти два метода были выбраны на основании широкого сопоставления, проведенного А.Н. Труфановым с соавторами в 2014 году.

Метод Казагранде предполагает, что превышение значения исторического давления приведет к появлению перегиба на кривой деформирования в полулогарифмическом масштабе. Для его достоверного определения необходимо выполнить стандартное компрессионное испытание, но при нагружении превысить (и значительно) предполагаемое историческое давление. Путем построения нескольких вспомогательных линий проводится определение данной точки.

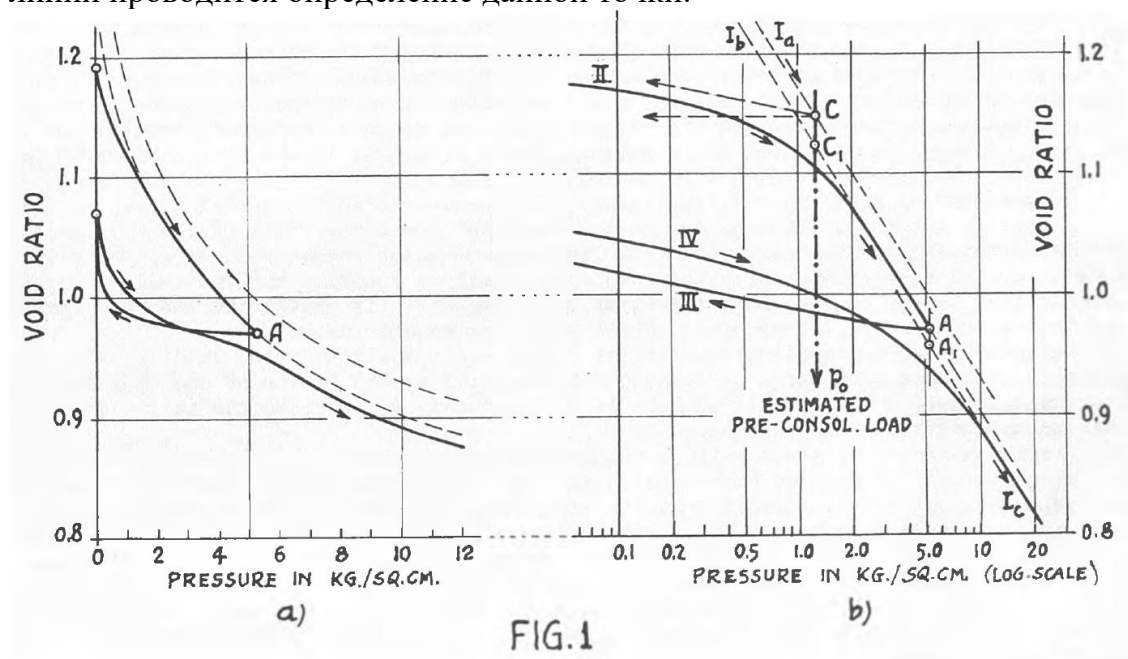
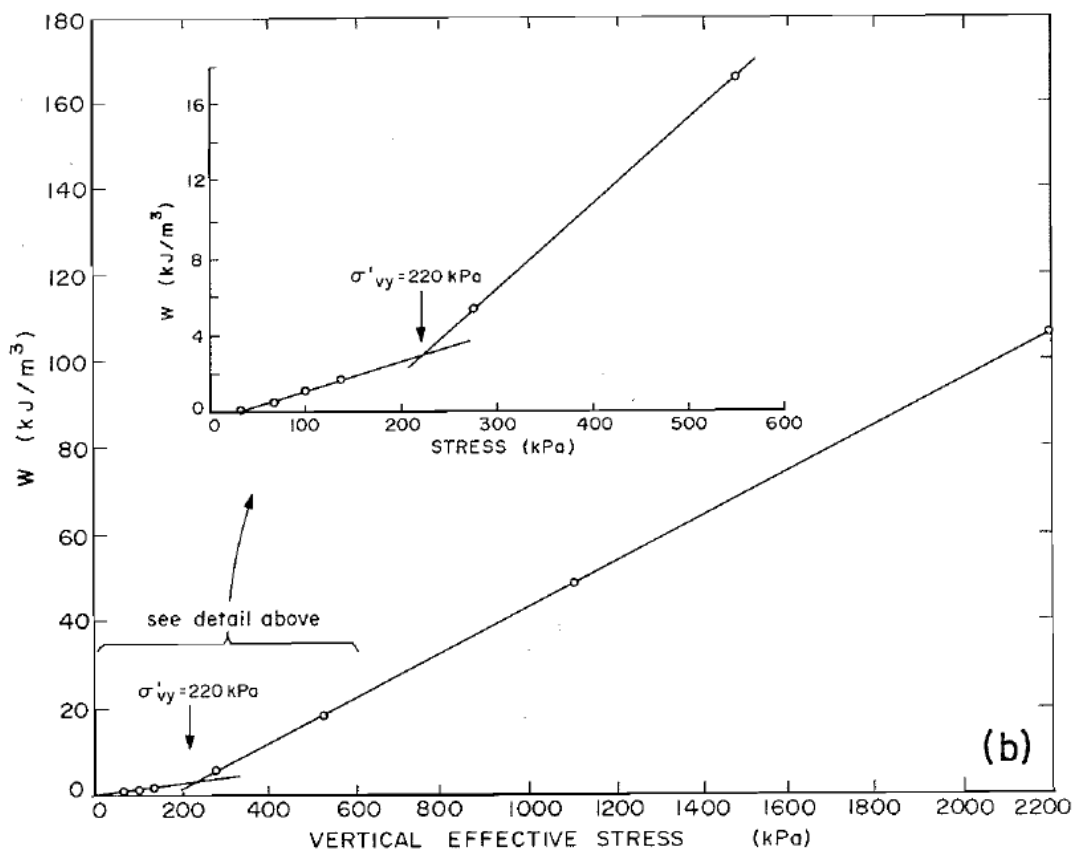


FIG.1

**Рис. 2.** Определение исторического давления методом Казагранде (ориг. иллюстрация Casagrande, 1936)

Недостатком метода является использования десятичного логарифма, что сильно снижает чувствительность. Для достоверного построения аппроксимирующей прямой к последнему линейному участку графика необходимо доводить давление при нагружении до значительных величин 8–10 МПа – такие нагрузки требуют повышенной жесткости испытательного оборудования. Необходимость дополнительных построений снижает повторяемость результатов испытаний, так как при интерпретации результат сильно зависит от выбора конкретного положения линии.

Метод Беккера основан на предположении об изменении работы деформаций  $W$  при превышении исторического давления. Для сжатия образца в компрессионном приборе необходимо совершить работу, величина которой легко определяется при известных деформациях и напряжениях. До достижения исторической нагрузки деформирование осуществляется исключительно за счет изменения объема пор и упругой работы связей, а после превышения исторической нагрузки – также за счет взаимного смещения частиц, что требует дополнительной энергии. В результате на зависимости «работа деформаций – напряжение» возникает перегиб в точке исторического давления.



**Рис. 3.** Определение исторического давления методом Беккера (ориг. иллюстрация Becker, 1987)

Данный метод использует линейный масштаб по оси напряжений, что не требует применения приборов с повышенными нагрузками. Тем не менее, как и любой графический метод, он имеет ограничение по точности, определяемое качеством построения и достоверностью положения аппроксимирующих кривых.

ГОСТ Р 58326-2018 регламентирует обработку результатов единичного опыта двумя способами, в качестве искомого исторического давления принимается меньшее значение

из двух методов. Предполагается, что завышение исторического давления (и, как следствие, влияния переуплотнения на НДС) приводит к снижению надежности проекта. Традиционный режим нагружения при компрессионном сжатии, предполагающий, что величина каждой последующей ступени вдвое превосходит предыдущую, не подходит для выполнения испытаний на переуплотнение. При обработке результатов в начале графика количество точек избыточно, а ближе к предельной нагрузке их недостает. Вместо этого рекомендуется увеличивать шаг ступеней на начальном этапе опыта и, наоборот, добавлять промежуточные ступени ближе к его концу.

ООО НПП «Геотек» предлагает автоматизированный испытательный комплекс АСИС Про для испытаний на переуплотнение дисперсных грунтов. В состав комплекса входят компрессионные одометры для образцов различных размеров и нагрузочные устройства для создания вертикального силового воздействия до 8 МПа, требуемых ГОСТ Р 58326-2018. Приборы позволяют приложить статическую нагрузку и вести автоматизированную регистрацию данных с высокой частотой на протяжении длительного времени, что способствует повышению качества результатов опыта.

Более подробную техническую информацию можно получить у специалистов компании или на сайте [www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru)

### **Список литературы**

- Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. М.: Прондо, 2014.
- ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
- ГОСТ Р 58326-2018. Грунты. Методы лабораторного определения параметров переуплотнения.
- Крамаренко В.В., Никитенков А.Н., Молоков В.Ю. О структурной прочности глинистых грунтов территории Томской области. Современные проблемы науки и образования, № 5, 2014.
- Труфанов А.Н. [и др.]. Методы определения параметров переуплотнения грунтов и их практическое применение в условиях Санкт-Петербурга. Инженерные изыскания, № 11, 2014.
- Becker D. E. [и др.]. Work as a criterion for determining in- situ and yield stresses in clays // Canadian Geotechnical Journal. 1987.
- Casagrande A. The Determination of the Pre-Consolidation Load and its Practical Significance Harvard: Harvard University, 1936.
- ISO 17892-5:2017. Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 5: Incremental loading oedometer test.