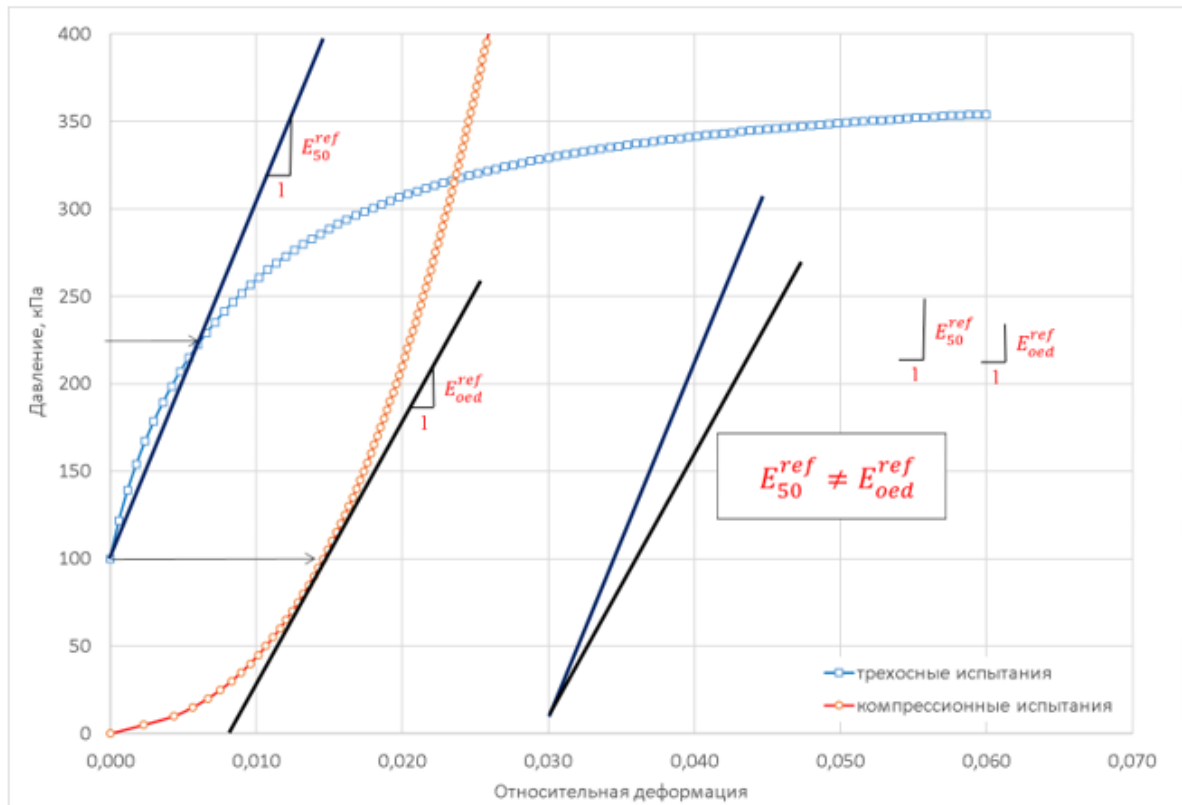


**Опорное давление в программе PLAXIS». Часть 1. Введение**



**В статье приводится информация о принципе опорного модуля деформации (как компрессионного, так и трехосного), который используется в модели HardeningSoil и ее производных. Этот принцип основан на теории расчета осадок Янбу и описании зависимости между напряжениями и деформацией на основе постоянной – модуля Янбу (этот метод мало известен в нашей стране). Принцип опорного модуля позволяет на основе несложной обработки лабораторного испытания получить опорные значения модулей деформации (которые могут не иметь отношения ни к бытовым, ни к суммарным напряжениям) и, отталкиваясь от них, определять измененное значение модуля деформации для конкретного (любого) напряженного состояния.**

**Федоренко Евгений Владимирович**  
Научный консультант ООО «НИП-Информатика», к.т.н.

Специалистам известно, что в модели HardeningSoil и ее производных используется принцип опорного модуля деформации (как компрессионного, так и трехосного). Этот принцип основан на теории расчета осадок Янбу и описании зависимости между напряжениями и деформацией на основе постоянной – модуля Янбу (этот метод мало известен в нашей стране).

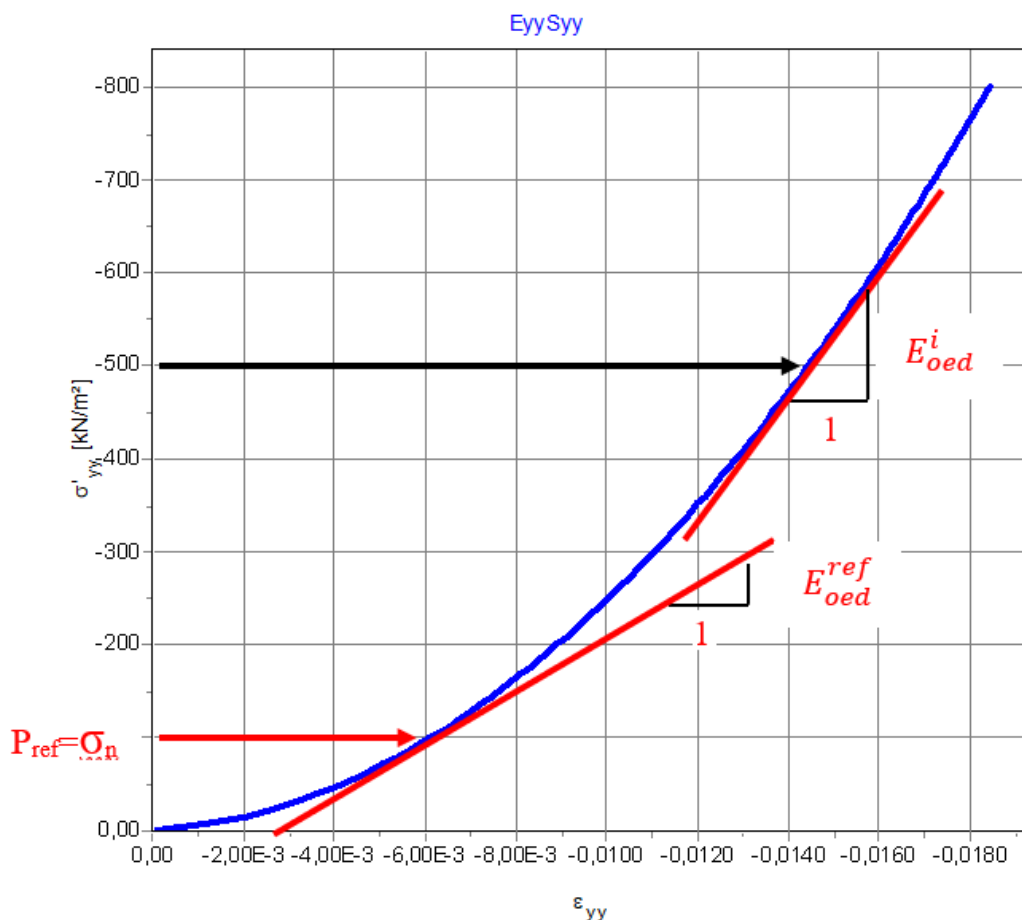
Принцип опорного модуля позволяет на основе несложной обработки лабораторного испытания получить опорные значения модулей деформации (которые могут не иметь отношения ни к бытовым, ни к суммарным напряжениям)

и, отталкиваясь от них, определять измененное значение модуля деформации для конкретного (любого) напряженного состояния.

При этом очень важно понимать два момента:

1. Опорное давление является параметром математической модели грунта (HardeningSoil и производных от нее), не имеет физического смысла и не является характеристикой реального грунта.
2. Принцип опорного (референтного) давления позволяет модели учитывать переменность жесткости (при сжатии и сдвиговых деформациях или девиаторном нагружении) в зависимости от напряжений (например, увеличение жесткости грунта с глубиной). Для удобства работы с моделью разработчики приняли в качестве этого параметра давление, связывающее два отличающихся испытания: трехосное и компрессионное. Известно, что напряженное состояние в этих опытах различается. Модель грунта, используя в качестве исходных данных оба вида испытаний, позволяет описывать два основных типа поведения грунта: объемное (компрессионное) сжатие и сдвиг (девиаторное нагружение). Для корректного объединения двух отличающихся типов поведения в единой модели используется опорное давление, которое является **опорным для обработки данных лабораторных испытаний**.

На рисунках 1 и 2 показан принцип использования опорного давления для учета увеличения модуля деформации с глубиной.



**Рис. 1.** Графическое представление принципа опорного давления в компрессионных испытаниях

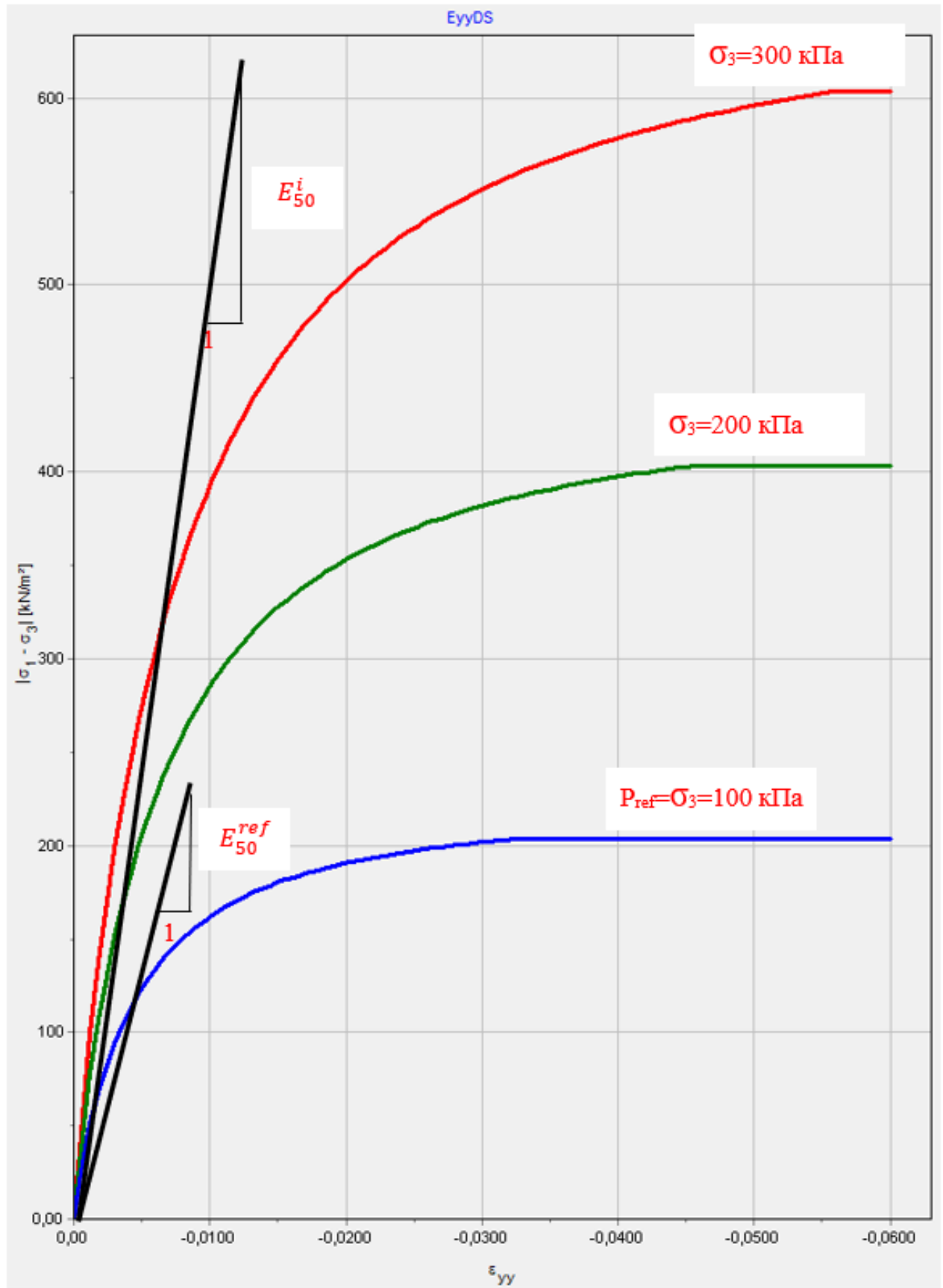


Рис. 2. Графическое представление принципа опорного давления в трехосных испытаниях (подробнее смотрите в Практикуме, часть 1. **СМОТРЕТЬ**)

Концепция модели предполагает получение текущей (i) жесткости (одометрический модуль или сдвиговый трехосный модуль) в зависимости от действующего уровня напряжений по формулам:

$$E_{oed}^i = E_{oed}^{\sigma_n=P_{ref}} \left( \frac{\sigma_i + c \cdot \cot \varphi}{P_{ref} + c \cdot \cot \varphi} \right)^m \quad (1)$$

$$E_{50}^i = E_{50}^{\sigma_3=P_{ref}} \left( \frac{\sigma_3 + c \cdot \cot \varphi}{P_{ref} + c \cdot \cot \varphi} \right)^m \quad (2)$$

Давление  $P_{ref}$  является опорным для каждого из испытаний, а модель HardeningSoil объединяя два независимых лабораторных испытания одним параметром  $P_{ref}$ , предполагает его единое значение. Безусловно, это теоретическое допущение модели, принятое для обеспечения возможности использовать модель без необходимости проводить специальные исследования грунта.

$P_{ref}$  – это условный параметр, не являющийся ни вертикальным, ни горизонтальным давлением в грунтовом массиве. На рисунке 3 схематично показан принцип выбора опорного давления  $P_{ref}$ .

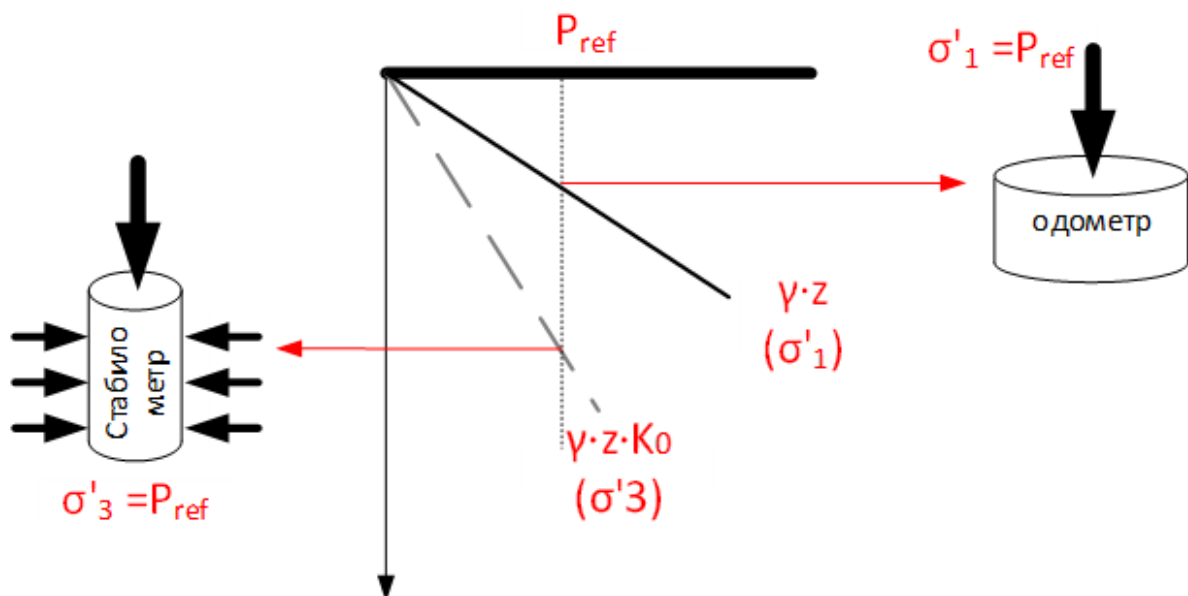


Рис. 3. Принцип выбора опорного давления

Из рисунка следует, что опорное давление  $P_{ref}$  не привязано к глубине отбора образца, поскольку вертикальные и горизонтальные напряжения на одной глубине в большинстве случаев не равны между собой. Для трехосного испытания (стабилометр) справедливо  $\sigma_3 = P_{ref}$  (давление обжатия до начала девиаторного нагружения), а для компрессионных испытаний (одометр)  $\sigma_1 = P_{ref}$ . Сопоставление испытаний показано на следующих примерах.

**Пример 1. Грунт с  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$**

На рисунке 4 показаны результаты трехосных изотропных КД испытаний, совмещенных на графике «относительная деформация ( $\epsilon_1 = \epsilon_y$ ) – давление ( $\sigma_1 = \sigma_y$ )». Для каждого испытания в соответствии с приведенными выше соображениями определены опорные значения жесткости: одометрической и сдвиговой.

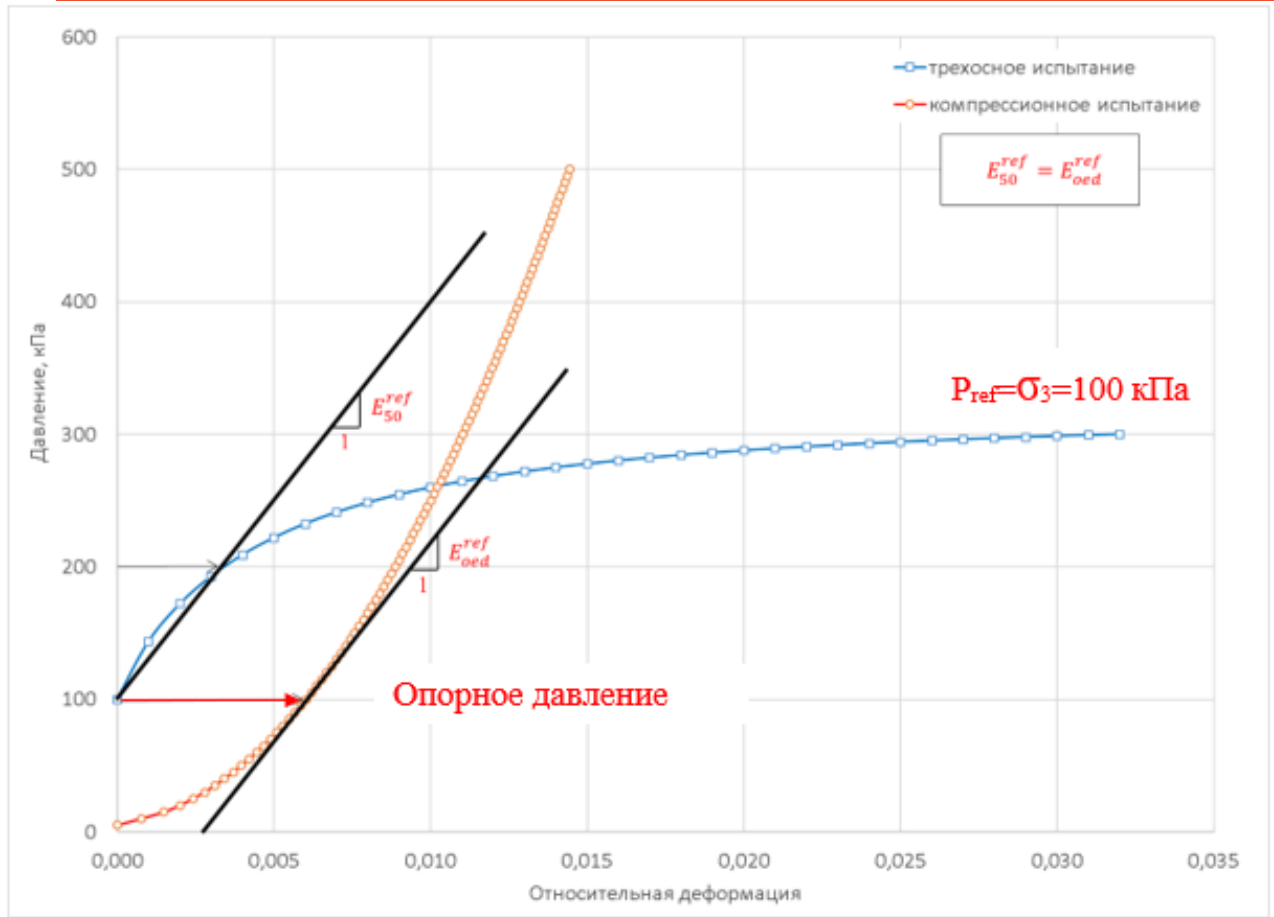


Рис. 4. Графическая интерпретация понятия опорная жесткость ( $P_{ref}=100$  кПа)

Из рисунка видно, что для песчаного грунта с параметрами, приведенными на рисунке 5, условие равенства  $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$  графически выполняются. А опорное давление связывает два независимых испытания.

Stiffness		Strength	
$E_{50}^{ref}$	30,00E3 кН/м <sup>2</sup>	$c'_{ref}$	0,000 кН/м <sup>2</sup>
$E_{oed}^{ref}$	30,00E3 кН/м <sup>2</sup>	$\varphi'$ (phi)	30,00 °
$E_{ur}^{ref}$	90,00E3 кН/м <sup>2</sup>	$\psi$ (psi)	0,000 °
power (m)	0,5000	$R_f$	0,9000
$v'_{ur}$	0,2000	Tension cut-off	<input checked="" type="checkbox"/>
$K_0^{nc}$	0,5000	Tensile strength	0,000 кН/м <sup>2</sup>
$P_{ref}$	100,0 кН/м <sup>2</sup>	<b>General properties</b>	

Рис. 5. Параметры модели для примера 1

По формулам (1) и (2) модель производит вычисления для пересчета жесткости, соответствующей текущему уровню напряжений. В графической форме результаты показаны на рисунке 6 в виде трехосных испытаний уже при давлении всестороннего обжатия  $\sigma_3=300$  кПа.

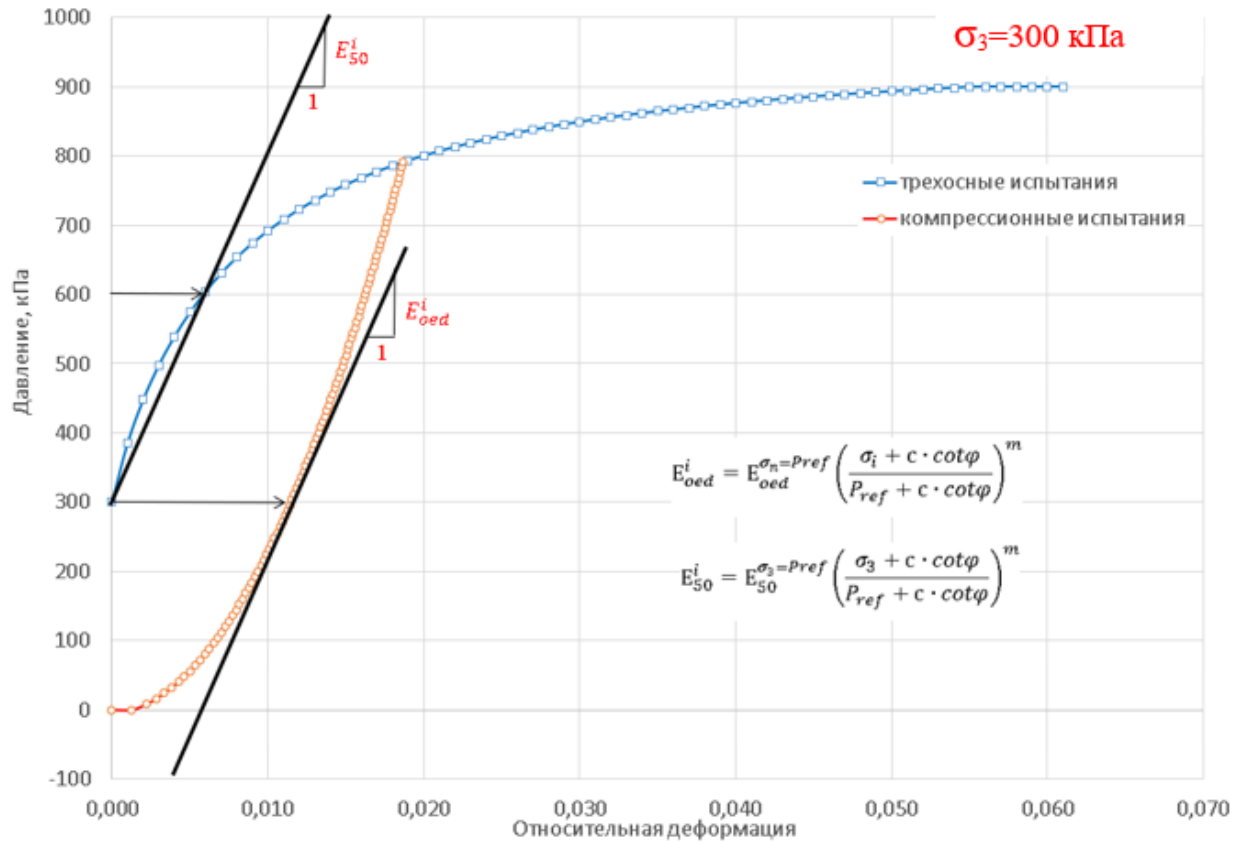


Рис. 6. Совмещенные графики испытаний для давления 300 кПа

Для наглядности на рисунке 7 показаны все четыре испытания в одной координатной сетке. В правой части рисунка, на выноске линий секущих модулей, видно, что опорные модули ( $E_{50}^{ref}$  и  $E_{oed}^{ref}$ ) и модули при другом уровне напряжений ( $E_{50}^i$  и  $E_{oed}^i$ ) отличаются, последние больше, следовательно грунт моделируется более жестким и менее деформативным.

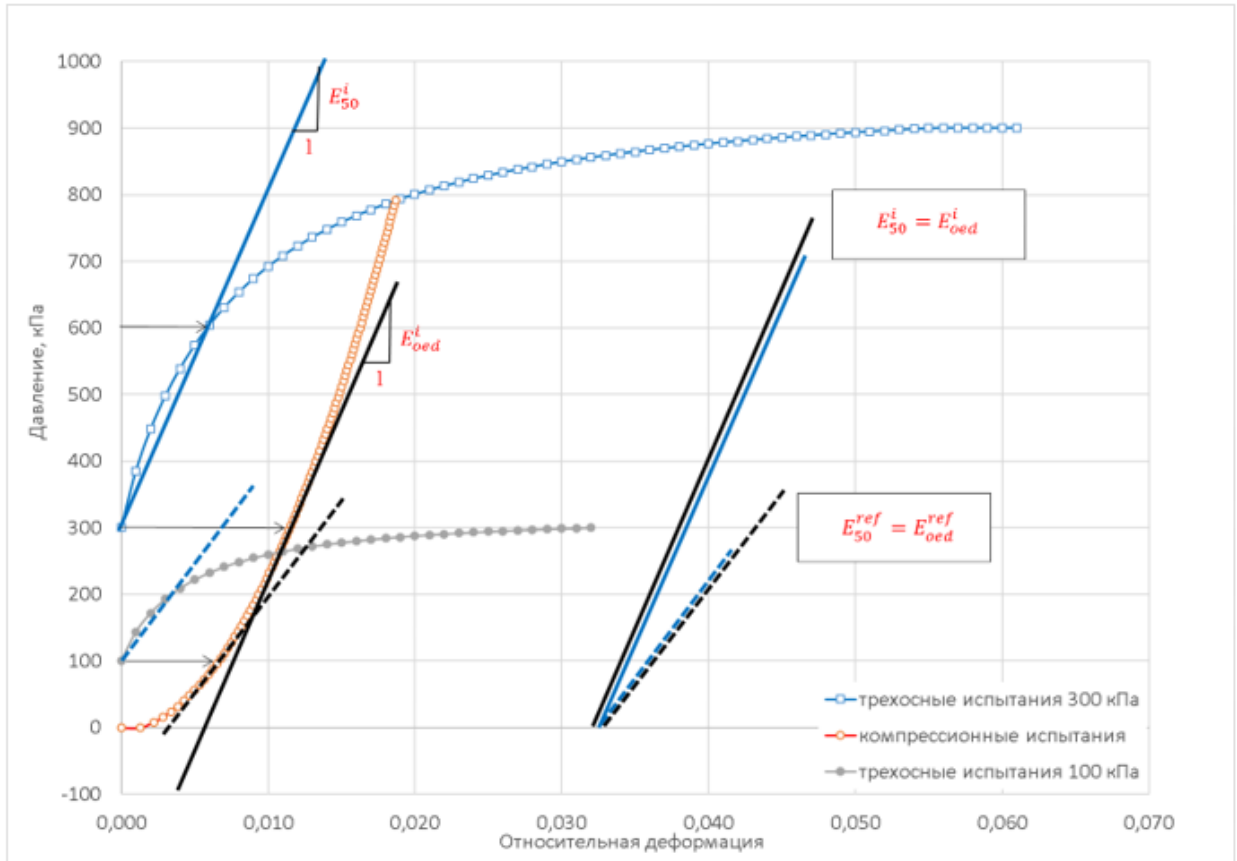


Рис. 7. Сопоставление опорной жесткости и жесткости при другом напряжении

Таким образом, из рисунка 7 следует, что модель HS учитывает возрастание как сдвиговой, так и объемной жесткости грунта при увеличении действующих напряжений (например, с глубиной). При этом равенство жесткостей в модели сохраняется.

**Пример 2. Грунт с  $E_{50}^{ref} \neq E_{oed}^{ref}$**

Аналогичным образом выполнены построения для грунта с различающимися параметрами жесткости (рис. 8). В практике считается, что отличие оedomетрической жесткости от трехосной (сдвиговой) присуще глинистым грунтам.

Property	Value	Unit
<b>Stiffness</b>		
$E_{50}^{ref}$	20,00E3	kN/m <sup>2</sup>
$E_{oed}^{ref}$	16,00E3	kN/m <sup>2</sup>
$E_{ur}^{ref}$	60,00E3	kN/m <sup>2</sup>
power (m)	0,6500	
<b>Strength</b>		
$c'_{ref}$	0,000	kN/m <sup>2</sup>
$\varphi'$ (phi)	34,00	°
$\psi$ (psi)	0,000	°

Рис. 8. Параметры модели для примера 2

На рисунке 9 показаны совмещенные результаты испытаний при опорном давлении  $P_{ref}=100$  кПа. Принцип единого значения опорного давления сохраняется.

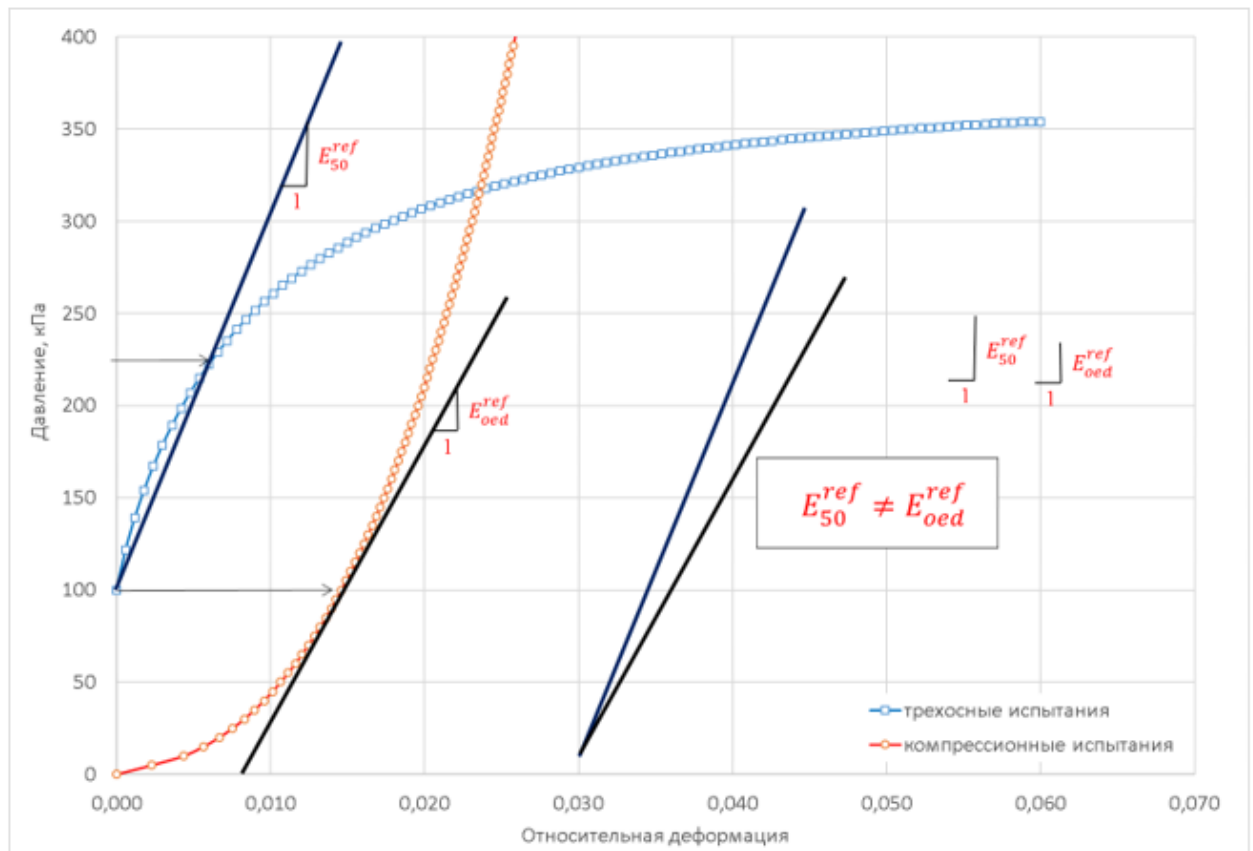


Рис. 9. Пример для грунта с  $E_{50}^{ref} \neq E_{oed}^{ref}$

Линии секущих модулей, показанные в правой части рисунка, иллюстрируют факт различия одометрического и трехосного модуля. Модель позволяет прогнозировать поведение грунтов как с равными жесткостями, так и с различными, это зависит от результатов лабораторных испытаний.

### Заключение

В этом обзоре показано, что современная модель грунта HardeningSoil использует переменное значение модуля деформации, а при проведении испытаний грунта в лаборатории не требует информации о нагрузках от сооружения, т.е. представляет собой универсальный механизм автоматизированного вычисления деформаций. В следующей части будет рассмотрен принцип выбора (назначения) опорного давления и сопоставительные примеры.