

УДК 544.723.237

## РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДЕРЖАННОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВДАВЛИВАНИИ ИНДЕНТОРА И СТИМУЛИРОВАНИЕ ЕГО ЖИДКОСТЬЮ

В.Д. Евсеев

Томский политехнический университет

E-mail: evseevvd@mail.ru

Рассматривается возможность реализации задержанного разрушения горной породы при действии на нее постоянным контактным давлением, оказываемым вдавливаемым в породу индентором, и стимулирование этого разрушения жидкостью. Экспериментально исследовано разрушение при различной величине контактного давления, установлено влияние на развитие разрушения жидкостей различной природы (вода, масло, этиловый спирт, четыреххлористый углерод). Разрушение связывается с развитием ползучести горной породы под пятном контакта.

### Ключевые слова:

Горная порода, индентор, разрушение, жидкость.

### Key words:

Rock, indenter, fracture, liquid.

При исследовании эффективности влияния жидкости на разрушение горной породы вдавливанием индентора в поверхность образца породы последний предварительно пропитывается жидкостью. Перед непосредственным вдавливанием индентора на поверхность образца наносится жидкость. В этом случае обеспечивается формирование ядра сжатия под пятном контакта и его разрушение в присутствии жидкости. Эксперимент проходит так же, как и при вдавливании индентора в сухой образец породы: вдавливающая индентором сила  $F$  растет до значения  $F_B$  в точке  $B$ , при котором происходит выкалывание породы под контактной площадкой и наблюдается резкий сброс усилия (рис. 1). При  $F > F_A$  на деформационной кривой происходит отклонение зависимости  $F=F(\delta)$  от линейной.

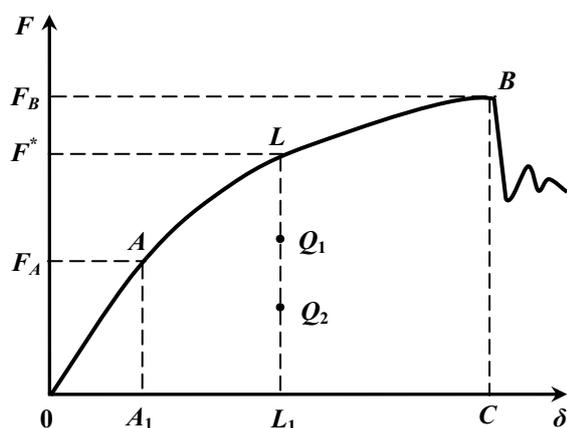


Рис. 1. Деформационная кривая упруго-пластичной горной породы при вдавливании индентора на установку УМГП-3;  $\delta$  – абсолютная деформация породы

Условие непрерывного роста осевого усилия до достижения выкола в методике определения механических свойств горных пород Л.А. Шрейнера является основополагающим, т.к. при создании методики считалось, что в породе под пятном контакта вне ядра сжатия развивается пластическая деформация. Согласно [1. С. 29], «пластическая де-

формация при постоянном контактом давлении будет исчерпана и процесс вдавливания прекратится». Само же ядро сжатия представлялось в качестве «своеобразного нароста» на основании индентора, лишенное из-за больших сжимающих напряжений «заметных пластических деформаций».

При таком проведении эксперимента эффективность влияния жидкостей на изменение механических свойств породы определяется после получения деформационной кривой  $F-\delta$  и ее обработки. Об эффективности влияния жидкостей на разрушение породы вдавливанием индентора судят по изменению твердости горной породы, условных предела текучести  $P_0$  и коэффициента пластичности, масштаба разрушения и пр.

В настоящее время взгляд на механизм разрушения горной породы под пятном контакта при вдавливании индентора претерпел изменения [2]. Развитие необратимой деформации горной породы непосредственно под пятном контакта связывается с реализацией объемного разрушения породы ядра сжатия. Неоднородность отношения величины касательных напряжений, вызывающих сдвиговую деформацию ядра, к величине среднего нормального напряжения, обеспечивающего изменение его объема, определяет различное развитие необратимой деформации в ядре: в нижней его части возникают трещины нормального отрыва и дилатансионное разрыхление породы. В верхней части, непосредственно под пятном контакта, разрыхление ядра ослабляется вплоть до полного исчезновения и развития дробления минералов, цемента с одновременным агрегированием, уплотнением и компактированием продуктов измельчения, увеличивающих зернограничное трение на адгезионных границах и сопротивление сдвигу. В соответствии с этим происходит изменение эффективности передачи осевого усилия ядром сжатия на окружающую горную породу: если измельчение приводит к увеличению эффективности передачи осевого усилия, то уплотнение продуктов измельчения и их

компактирование снижает эффективность передачи усилия. Такое понимание природы остаточной деформации в горной породе под пятном контакта позволяет провести эксперимент по оценке эффективности влияния жидкости на разрушение горной породы несколько иначе.

Разрушения горной породы под индентором следует ожидать при длительном действии на нее контактным давлением  $P^*$ , превышающем условный предел текучести  $P_0$ , но уступающем ее агрегатной твердости  $P_{ш}$ :  $P_0 < P^* < P_{ш}$ . На деформационной кривой (рис. 1) этой ситуации отвечает положение точки  $L$ . Здесь работа деформирования горной породы ядра сжатия определяется работой упругого деформирования  $A_у$ , численно равной площади треугольника  $OAA_1$ , и работой неупругого деформирования (работа разрушения)  $A_н$  (площадь фигуры  $A_1ALL_1$ ).

При таком испытании следует ожидать не только выкалывания породы под пятном контакта спустя время  $T$  после создания нагрузки  $P^* = \text{const}$  (задержанный выкол), но и появления на деформационной кривой  $F-\delta$  запредельного участка деформирования, на котором происходит снижение усилия  $F^*$  при росте деформации  $\delta$ .

Принципиальная возможность получения задержанного выкола была нами проверена на мелкозернистом кварцевом песчанике с глинисто-кремнистым цементом с величиной открытой пористости 0,3 %, алевролите (0,46 %), туффите (1,8 %), диорите (1,7 %), олигомиктовом песчанике с каолинито-кремнистым цементом (8,4 %). Образцы горных пород изготавливались из кернов различного диаметра (от  $56 \cdot 10^{-3}$  до  $90 \cdot 10^{-3}$  м).

При достижении усилием вдавливания произвольной величины  $F^*$ , обеспечивающей превышение контактным давлением  $P^*$  значения  $P_0$ , рост нагрузки прекращался и одновременно включался секундомер.

**Таблица 1.** Характеристики задержанного разрушения горных пород при вдавливании индентора

Горная порода	$P^*/P_0$	$A_n \cdot 10^2$ , Н·м	$T$ , с
Кварцевый песчаник	1,06	8,5	2220
	1,12	12,2	1800
	1,25	25,9	80
	1,27	28,0	3
Туффит	1,06	17,1	14
	1,11	6,9	*
	1,28	25,0	17
	1,33	14,1	167
Песчаник олигомиктовый	1,85	59,0	10
	1,98	57,0	5
	2,02	33,0	120
Алевролит	1,31	30,2	**
	1,38	25,6	***
	1,43	35,4	111
	1,46	28,1	660
Диорит	1,36	32,5	9300
	1,40	44,8	4
	1,60	27,6	181

\*Выкол не произошел в течение 43 ч нагружения.

\*\*Выкол произошел в интервале 3...17 ч.

\*\*\*Выкол произошел в интервале 7,5...18 ч.

Результаты предварительного эксперимента, проведенного при разовом значении отношения  $P^*/P_0$  для каждого образца горной породы, представлены в табл. 1. Видно, что для разрушения горной породы вдавливанием индентора условие непрерывного роста нагрузки на породу не является обязательным: задержанный выкол не произошел только в одном случае: при вдавливании индентора в туффит, когда работа разрушения  $A_н$  была минимальной.

Опыт показал также, что условие  $P^* > P_0$  далеко не всегда обеспечивает ожидаемое снижение длительности задержанного разрушения (снижение  $T$  при росте  $P^*$ ,  $A_n$ ): из шести горных пород только при нагружении кварцевого песчаника рост контактного давления  $P^*$  и энергии неупругого деформирования  $A_н$  обеспечил ожидаемое снижение  $T$ . Это, скорее всего, связано с неоднородностью свойств горных пород. При сравнении средних значений величин должно наблюдаться снижение  $T$  при росте  $P^*$ ,  $A_n$ .

Задержанный «сухой» выкол сопровождается снижением величины усилия  $F^*$  по линии  $LL_1$  до значения силы, соответствующей точке  $Q_1$ . Снижение  $F^*$  происходит как медленно и непрерывно, так и быстро, но с остановками, сопровождаясь отчетливо слышимым потрескиванием породы. Внешение жидкости (вода, этиловый спирт) в область пятна контакта приводит к дополнительному снижению усилия  $F^*$  до величины силы, соответствующей точке  $Q_2$ .

Эксперимент с диоритом был продолжен: при вдавливании индентора в породу нагрузку увеличивали до фиксированного контактного давления  $P^* = \text{const}$ , которое определяло длительность задержанного выкола. Было проведено 13 вдавливания и получено 9 выколов. В табл. 2 приведены усредненные величины, характеризующие задержанное разрушение диорита.

**Таблица 2.** Усредненные значения задержанного разрушения диорита в сухом состоянии

$P^*/P_0$	$A_n \cdot 10^2$ , Н·м	$A_n/A_y$	$T$ , с
1,38	41,7	1,7	182,5

В четырех случаях задержанного выкола не произошло и при более длительном действии постоянной нагрузки на сухую поверхность породы (табл. 3). В первом, втором и четвертом из указанных случаев выкол был искусственно стимулирован введением из пипетки в область контакта дистиллированной воды: разрушение произошло. В третьем случае выкол не наступил и при использовании водной стимуляции; эксперимент был прекращен. Из табл. 3 видно, что это произошло при малой величине отношения  $A_n/A_y$ .

Исследование стимулирующего действия жидкости на разрушение породы при  $P^* = \text{const}$  было продолжено на кварцевом и олигомиктовом песчаниках. Постоянное контактное давление действовало на сухой образец кварцевого песчаника

60 мин, на образец олигомиктового песчаника – 6,5 мин. Задержанного выкола не было зафиксировано ни в одном из этих опытов. Затем в область пятна контакта вводилась из пипетки жидкость. При проведении испытаний с кварцевым песчаником использовалась дистиллированная вода и было реализовано 6 вдавливаний, подсолнечное масло (5 вдавливаний), а при работе с олигомиктовым песчаником – вода (5 вдавливаний) и этиловый спирт (11 вдавливаний).

**Таблица 3.** Стимулирование сухого задержанного разрушения диорита водой

$P^*/P_0$	$A_n \cdot 10^2$ , Н·м	$A_n/A_y$	Время нагружения без выкола, $10^4$ , с	Длительность выкола, стимулированного водой, $T$ , с
1,45	35,9	1,59	2,64	90
1,37	32,3	1,41	4,98	770
1,37	26,7	1,09	5,19	>10 <sup>3</sup>
1,36	24,8	1,14	10,65	562

Обработка деформационных кривых показала, что контактное давление только в двух случаях (из 11) превысило величину  $P_0$  кварцевого песчаника: одно ( $P^*/P_0=1,07$ ) – при исследовании задержанного разрушения, стимулированного водой, и другое ( $P^*/P_0=1,09$ ) – при исследовании задержанного разрушения, стимулированного маслом. Во всех остальных вдавливаниях постоянное контактное давление обеспечило упругое деформирование породы и не обеспечило задержанного разрушения в течение указанного выше времени действия постоянной нагрузки. Но введение воды и масла в область пятна контакта стимулировало развитие задержанного выкола.

Введение воды не только обеспечило развитие задержанного разрушения, но и резко ускорило его наступление: время задержанного разрушения изменялось в диапазоне от 1 до 60 с. Только в одном случае разрушение не произошло и спустя 10 минут после введения в область пятна контакта воды. В этом опыте при  $A_n=0$  и величина упругой энергии была минимальной  $A_y=25,7 \cdot 10^{-2}$  Н·м, в других пяти случаях, когда выкол произошел, величина  $A_y$  была больше: изменялась в диапазоне от  $30,9 \cdot 10^{-2}$  до  $60,6 \cdot 10^{-2}$  Н·м.

Растительное масло обеспечило разрушение кварцевого песчаника в двух из пяти случаев: через 600 и 2700 с после введения масла в область контакта. В первом случае ( $T=600$  с) разрушение обеспечили следующие параметры нагружения:  $P^*/P_0=1,09$ ,  $A_n=11,4 \cdot 10^{-2}$  Н·м, во втором ( $T=2700$  с)  $A_n=0$ ,  $A_y=37,6 \cdot 10^{-2}$  Н·м. В трех вдавливаниях разрушение под пятном контакта не наступило и спустя первые часы, а при  $A_n=0$ ,  $A_y=25,1 \cdot 10^{-2}$  Н·м масло не вызвало разрушение и через 5 ч действия нагрузки.

Приведенные в табл. 4 результаты исследования задержанных выколов олигомиктового и кварцевого песчаников, стимулированных водой и этиловым спиртом, также свидетельствуют о превосходстве воды над этанолом в способности стимулировать задержанное разрушение.

**Таблица 4.** Усредненные характеристики задержанного разрушения олигомиктового песчаника, стимулированного жидкостью

Горная порода	Жидкость, число опытов	$P^*/P_0$	$A_n \cdot 10^2$ , Н·м	$A_n/A_y$	$T$ , с
Олигомиктовый песчаник	Вода, 5	1,95	33,2	5,82	0,8
	Этиловый спирт, 11	1,87	34,9	6,12	5,9
Кварцевый песчаник	Вода, 12	1,17	15,6	0,63	6,2
	Этиловый спирт, 8	1,19	19,1	0,77	20,0

На олигомиктовом песчанике было исследовано влияние воды, подсолнечного масла, четыреххлористого углерода на развитие задержанного разрушения: жидкости вводились в область пятна контакта сразу при достижении усилием вдавливания значения  $F^*$ . В табл. 5 приведены средние значения величины.

**Таблица 5.** Усредненные характеристики задержанного разрушения олигомиктового песчаника, стимулированного жидкостью, без предварительной выдержки под нагрузкой в сухом состоянии

Жидкость	Число опытов	$P^*/P_0$	$A_n \cdot 10^2$ , Н·м	$A_n/A_y$	$T$ , с
Вода	7	1,57	15,3	2,83	2,0
	10	1,41	9,8	1,69	4,6
	8	1,16	2,7	0,54	6,0
	10	1,13	2,2	0,44	24,2
	10	1,11	1,9	0,37	65,8
Масло	12	1,61	19,9	3,68	194,7
$CCl_4$	6	1,60	15,6	3,69	*

\* Во всех опытах выкол не произошел в течение 1800 с наблюдения.

Данные табл. 5 (первые пять строк) показывают ожидаемую связь между  $T$  и  $P^*/P_0$  (и  $A_n$ ): последовательное снижение контактного давления с 1013 до 688 МПа вызвало существенный рост времени задержанного разрушения.

Из приведенного на рис. 2 графика функции  $T=T(P^*/P_0)$  видно, что резкое возрастание  $T$  происходит при  $P^*/P_0 > 1,2$ . Вероятно, это неравенство определяет величину контактного давления, при достижении которого в горной породе под пятном контакта происходит более интенсивное трещинообразование, чем на участке, где выполняется неравенство  $1,2P_0 > P^* > P_0$ .

После установления необходимой величины контактного давления (рост нагрузки остановлен), но при включенной записи деформации зафиксирована ниспадающая ветвь деформационной кривой (запредельный участок деформирования). Секундомер включался в момент достижения контактным давлением намеченной величины и введения в область пятна контакта этилового спирта. Уже в первом опыте, в котором выполнялось условие нагружения  $P^* \sim P_0$ , была зафиксирована запредельная кривая деформирования олигомиктового песчаника: в течение 70 мин усилие  $F$  снизилось от 1525 до 1300 Н, деформация выросла на  $1,1 \cdot 10^{-4}$  м. Это медленное снижение усилия завершилось резким его спадом и выколом породы.

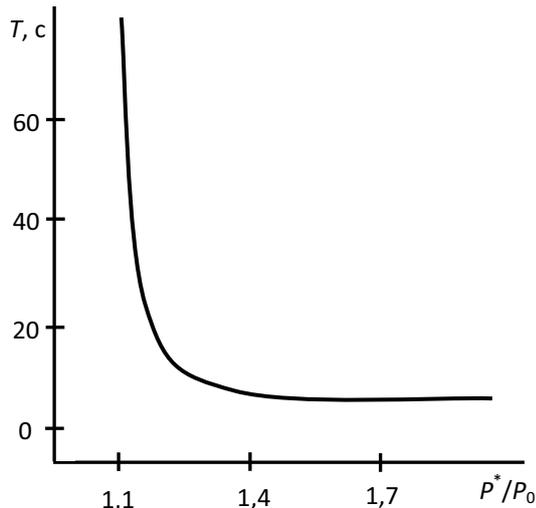


Рис. 2. Зависимость времени задержанного разрушения от отношения  $P^*/P_0$

Было проведено 27 вдавливания, две серии испытаний: в первой серии выдерживалось отношение  $P^*/P_0=1,05$ , во второй – 1,10. Рост контактного давления привел к росту работы неупругой деформации с  $0,22 \cdot 10^{-2}$  до  $1,49 \cdot 10^{-2}$  Н·м и снижению времени задержанного разрушения с 213,7 до 56,7 с. Проставленные на графиках постоянные интервалы времени наглядно демонстрируют неравномерность развития деформации: с приближением выкола наблюдается рост абсолютной деформации между соседними метками времени (рис. 3).

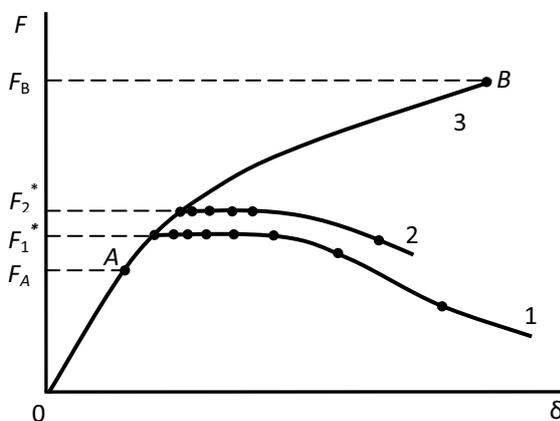


Рис. 3. Запредельный участок на деформационной кривой: 1,2) развитие задержанного выкола при  $P^*/P_0=1,05$ ,  $P^*/P_0=1,10$ , соответственно; 3) деформационная кривая при непрерывном вдавливании индентора

При проведении статистической обработки экспериментальных данных было обнаружено, что коэффициент вариации распределения времени задержанного разрушения достигает нескольких десятков процентов. Максимальное значение коэффициента вариации, равное 155 %, отмечено при разрушении диорита (при доверительной вероятности 0,95, 9 опытов). Оно значительно превосходит коэффициенты вариаций распределения ве-

личин  $P_{ш}$ ,  $P_0$ ,  $A_{ш}$ ,  $A_y$ . Например, коэффициент вариации распределения условного предела текучести диорита равен 6,8 %. Естественно, также контрастно выглядит и доверительная оценка этих величин:  $P_0=2433 \pm 124,8$  МПа,  $T=183 \pm 218,3$  с.

Задержанное разрушение, возникающее при действии на поверхность горной породы постоянным контактным давлением, является следствием развития ползучести породы ядра сжатия как на стадии упругого, так и на стадии неупругого деформирования.

Проникновение жидкости в область разрушения под пятном контакта облегчается формированием первой экстремальной области в горной породе на периферии пятна контакта. Вдавливание индентора приводит если не к появлению здесь конической трещины, уходящей в глубь породы, то, во всяком случае, к росту повреждаемости породы (появление растягивающих напряжений на поверхности образца около пятна контакта, развитию трещиноватости). Проникая в горную породу под пятном контакта, жидкость может влиять на разрушение вследствие эффекта П.А. Ребиндера, изменения межзернового трения в ядре (жидкость – «третье тело»), стимулирования сдвигового разрушения ядра сжатия вследствие роста давления жидкости в изолированных порах [3]. Стимулирующее действие жидкости на возникновение задержанного выкола будет определяться вязкостью, сжимаемостью жидкости, размером ее молекул, большим снижением прочности минералов из-за эффекта П.А. Ребиндера. По этим параметрам вода явно превосходит этиловый спирт, четыреххлористый углерод, растительное масло.

Обнаруженное в некоторых опытах отсутствие задержанного разрушения связано, по нашему мнению, с недостаточно развитым трещинообразованием в породе под пятном контакта, которое обеспечивало контактное давление в каждом конкретном случае.

Практика бурения скважин свидетельствует о том, что введение в буровой раствор понизителей твердости не вызывает ожидаемого облегчения разрушения горной породы забоя [4]. По этой причине для достижения этой цели необходимо вводить такие добавки в буровой раствор, которые способствуют увеличению коэффициента сжимаемости раствора и снижению трения между зернами минералов на адгезионных границах.

### Выводы

Экспериментально показано разрушение горной породы при действии на нее постоянным контактным давлением, превышающим условный предел текучести. Жидкость стимулирует развитие задержанного разрушения. Для оценки способности жидкостей влиять на разрушение горных пород можно использовать статическое нагружение с последующей добавкой жидкости в область пятна контакта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механические и абразивные свойства горных пород / под ред. Л.А. Шрейнера. – М.: Изд-во Гостоптехиздат, 1958. – 202 с.
2. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Механизм разрушения горных пород при вдавлении штампа и развитие методики определения их механических свойств // Известия вузов. Горный журнал. – 1998. – № 11–12. – С. 5–8.
3. Евсеев В.Д. Механизмы влияния жидкости на разрушение горных пород при вдавлении индентора // Геологическое и горное образование. Геология нефти и газа: Матер. Междунар. научно-техн. конф. – Томск, 2001. – С. 86–88.
4. Евсеев В.Д. О причине невозможности использования эффекта П.А. Ребиндера при бурении скважин // Бурение и нефть. – 2010. – Вып. 9. – С. 10–12.

Поступила 27.10.2010 г.

УДК 624.131

## РАСШИРЕННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Л.А. Строкова

Томский политехнический университет

E-mail: geyer@tpu.ru

*Анализ российских и зарубежных норм по обработке данных компрессионных испытаний грунтов показал, что параметры предельно напряженного состояния грунтов фактически не используются отечественными компаниями в расчетах оснований инженерных сооружений, но повсеместно присутствуют в программной продукции, выпускаемой ведущими западными разработчиками. Представлены результаты определения дополнительных параметров по компрессионным испытаниям, необходимых для численного моделирования поведения грунтов.*

### Ключевые слова:

*Численное моделирование, упруго-пластическая модель с упрочнением, дополнительные параметры модели, механические свойства, степень переуплотнения, давление предуплотнения.*

### Key words:

*Numerical simulations, elasto-plastic model with hardening, advanced model parameters mechanical properties, overconsolidation ratio, preconsolidation pressure.*

Комплексное изучение и оценка инженерно-геологических условий предполагаемой площадки строительства любого типа инженерных сооружений, а также прогноз их изменения в процессе эксплуатации базируются на результатах инженерных изысканий. Основными задачами изысканий являются: расчленение геологического разреза; определение состава, состояния и характеристик грунтов (физических, прочностных, деформационных, фильтрационных и теплофизических) в условиях естественного залегания; оценка пространственной изменчивости свойств грунтов; инженерно-геологическая схематизация основания для обоснования основных параметров проекта таких, как тип основания; конструкции, материал и размеры фундаментов на основе предполагаемых предельных состояний.

Инженерно-геологические изыскания, специальные лабораторные и полевые исследования грунтов для проектирования сооружений, как по российским, так и по зарубежным стандартам должны обеспечить получение следующих характеристик грунтов:

- влажности, плотности, плотности частиц грунта, гранулометрического состава, пределов пластичности для связных грунтов, коэффициента

пористости и степени плотности для несвязных грунтов;

- прочности в полных напряжениях (в нестабилизированном состоянии)  $\varphi$  и  $c$  и/или сопротивления недренированному сдвигу  $s_u$ ;
- прочности в эффективных напряжениях (в стабилизированном состоянии)  $\varphi'$  и  $c'$ ;
- деформируемости грунтов при статических нагрузках (модуль деформации  $E$  первичный и вторичный, а также коэффициент Пуассона  $\nu$ );
- водопроницаемости  $k_f$  и консолидации  $c_v$ .

Кроме того, в западной практике проектирования базовыми характеристиками основания являются также показатели природного напряженного состояния грунтов: давление предуплотнения  $\sigma'_p$  (*preconsolidation pressure*), степень переуплотнения OCR (*overconsolidation ratio*) и коэффициент бокового давления в массиве грунта  $K_0$ . Российскими нормами определение показателей природного напряженно-деформированного состояния грунтов рекомендуется, но состав таких характеристик и методы их определения не регламентируются [1]. В настоящее время предложен проект стандарта для определения характеристик деформируемости грунтов в условиях компрессионного сжатия и давления предуплотнения [2].