

УДК 624.131

UDC 624.131

**ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ПРОЧНОСТИ
ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПРИ ПОСТОЯННО
ВОЗРАСТАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ**

**THE STUDY OF PRECONSOLIDATION PRES-
SURE OF LOAMY SOIL WITH THE CON-
STANT RATE OF LOADING**

Ляшенко Павел Алексеевич
к.т.н., профессор
*Кубанский государственный аграрный универси-
тет, Краснодар, Россия*

Liashenko Pavel Alekseevich
Cand.Tech.Sci., professor
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Денисенко Виктор Викторович
к.т.н., доцент
*Кубанский государственный технологический уни-
верситет, Краснодар, Россия*

Denisenko Viktor Viktorovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
*Kuban State Technology University, Krasnodar, Rus-
sia*

Беляева Юлия Александровна
студент инженерно-строительного факультета
*Кубанский государственный аграрный универси-
тет, Краснодар, Россия*

Belyaeva Yulya Aleksandrovna
student of the Building and Engineering faculty
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Изучалась структурная прочность, или давление
предуплотнения, глинистых грунтов естественной
структуры. Применён метод компрессионного
сжатия с постоянной скоростью увеличения давлени-
я на образец на приборе АКП-6НМ. Приведены
результаты анализа скорости деформации образ-
цов. Предложен метод определения значений
структурной прочности и давления смятия по гра-
фику скорости деформации

The preconsolidation pressure of natural loamy soils
was researched with the method of constant rate of
loading (CRL) and the continuous measuring of de-
formations at the apparatus АКП-6НМ. The results of
the rate of deformation analysis have been offered. The
method of the preconsolidation pressure and the crum-
ple pressure values has been suggested based on the
rate of deformation analysis

Ключевые слова: СТРУКТУРНАЯ ПРОЧНОСТЬ,
ДАВЛЕНИЕ ПРЕДУПЛОТНЕНИЯ, КОМПРЕС-
СИОННОЕ СЖАТИЕ, СКОРОСТЬ, СКОРОСТЬ
НАГРУЖЕНИЯ, СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ

Keywords: PRECONSOLIDATION PRESSURE,
CONSTANT RATE OF LOADING, SOIL DEFOR-
MATIONS, RATE OF DEFORMATION ANALYSIS

Введение

Сжимаемость грунтов является следствием переупаковки частиц при
всестороннем сжатии [1]. Известно, что объём грунта изменяется во вре-
мени при постоянном всестороннем давлении и при сдвиге, вследствие
вязкого сопротивления межчастичных связей [2].

«При компрессионном сжатии одновременно с объёмными дефор-
мациями развиваются и сдвиговые деформации... Наличие гистерезиса го-
ворит об упруго-пластическом характере деформирования образцов» [3].
«Для грунтов естественной ненарушенной структуры компрессионная
кривая... имеет резкий перелом, соответствующий достижению структур-

ной прочности сжатия грунта» [1]. Значение структурной прочности p_{str} , или давления переуплотнения, устанавливается по этому перелому.

Этот метод определения неточен и субъективен и не учитывает происходящих изменений микроструктуры грунта. Компрессионная кривая, во-первых, не имеет достаточно чёткого перелома, а во-вторых, есть перелом, вызванный неровностями торцов образца.

Нарушения микроструктуры на уровне отдельных частиц не заметно в опыте с макроскопическим образцом из-за их малых размеров, а также из-за больших ступеней нагрузки, применяемых обычно в таких испытаниях: от 25 кПа и более. Изучение микроструктуры образцов грунта при сдвиге с помощью оптического микроскопа показало, что «происходит уплотнение грунта с образованием новых межчастичных связей взамен нарушенных» [2], в случае затухающей ползучести. При установившемся течении происходят заметные изменения структуры в виде изменения ориентации частиц, распада агрегатов и развития микротрещин. Эти изменения могут быть зарегистрированы прибором в макроскопическом опыте, если провести компрессионное испытание образца постоянно возрастающим давлением с непрерывным наблюдением за деформацией [4].

1 Компрессионное сжатие образцов грунтов при постоянно возрастающем давлении

Опыты проводились нами в условиях компрессионного сжатия при постоянно возрастающем давлении на образец $S = Bt$, где B - постоянный параметр (скорость) нагружения образца грунта, равный $B = 5,787$ Па/с; t - время с начала нагружения. Осадка образцов регистрировалась непрерывно с шагом 0,005 мм. Опыты проводились на автоматизированном компрессионном приборе АКП-6НМ конструкции В.В. Денисенко [4].

Использовались образцы глинистых грунтов природного сложения высотой 25 мм с площадью сечения 60 см². Перед опытом измерялись физические свойства: плотность, влажность, пористость, пределы пластичности, показатель текучести (Таблица 1).

В результате испытаний получена запись давления на образец и его осадки по нескольким десяткам точек с шагом записи 0,005 мм осадки, что позволило выразить осадку образца в функции времени и давления на образец $s = s(S) = s_1(Bt)$ (Рисунок 1). Эта зависимость отражает неравномерное увеличение осадки с ростом давления. Дифференцирование этой функции $\Delta s / \Delta S = V(S)$ дало значение скорости осадки и показало её изменение в процессе нагружения более ярко (Рисунок 2).

Таблица 1 – Характеристики физических свойств грунтов

Индекс образца	Глубина отбора,	Влажность грунта	Плотность скелета	Коэффициент пористости	Число пластичности
	м	W	g _d	e	I _p
	%	г/см ³			
1	2	3	4	5	6
118	6,0	26	1,54	0,760	15
3	1,0	25	1,32	1,053	17
51	8,0	28	1,53	0,778	19
61	5,0	22	1,73	0,578	21
5	2,0	19	1,58	0,715	25

Скорость осадки изменяется циклически. Амплитуды циклов измеряются единицами и первыми десятками микрометров на Ньютон сжимающей силы. Погрешность измерения скорости осадки не превышает 0,4 мкм/Н. Погрешность прибора измерялась с помощью образцового динамометра сжатия. Измерения показали, что линейность приложения сжимающей силы выдерживается с достоверностью 0,9987.

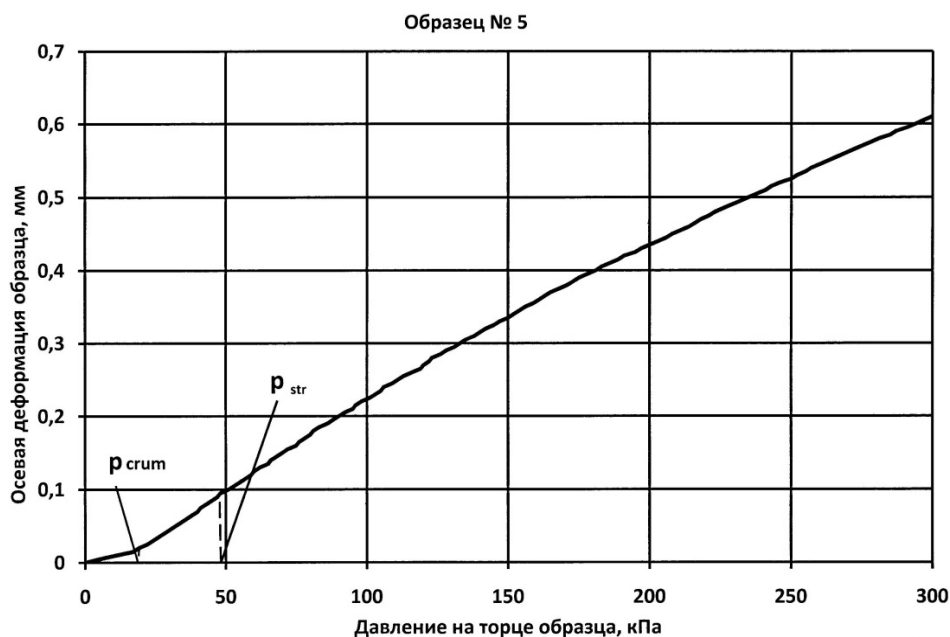


Рисунок 1 – График изменения осадки образца № 5 при компрессионном сжатии постоянно возрастающим давлением

Каждый *цикл деформации* состоит из восходящей и нисходящей ветвей (Рисунок 2). На нисходящей ветви длиной ΔP_e осадка штампа прибора увеличивается на величину Δs_e , на восходящей – длиной ΔP_r осадка увели-

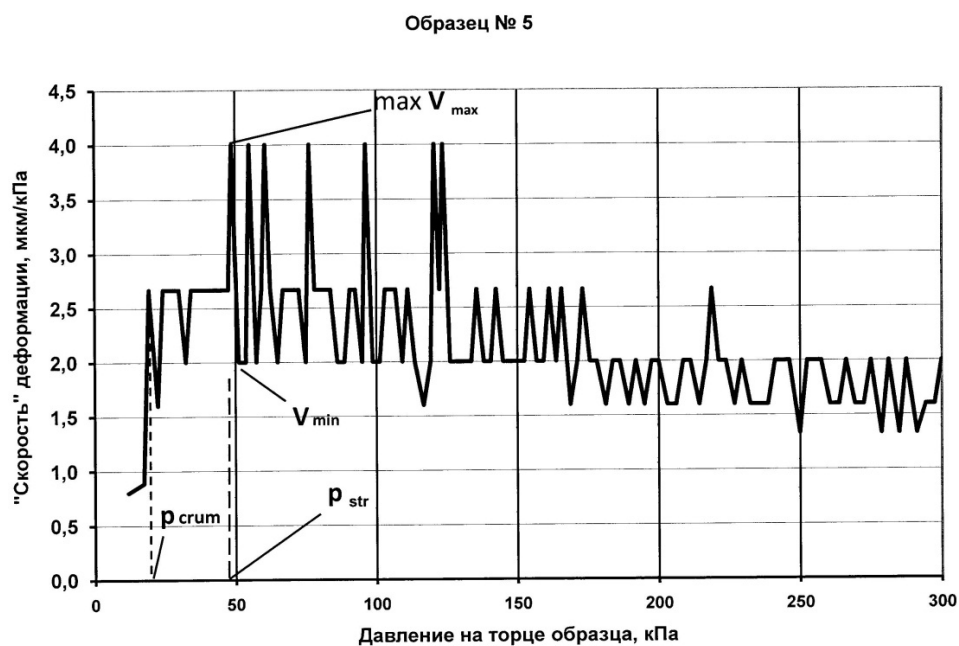


Рисунок 2 – По графику «скорости» осадки выделяется более чётко определяются значения давления смятия P_{crum} и структурной прочности $[0 ; P_{crum}]$.

чивается на величину Δs_r . Максимальную скорость в цикле обозначим через V_{\max} , минимальную - V_{\min} . Значения максимальной скорости достигают своего максимума $\max V_{\max}$ при некотором значении давления, которое известно как «структурная прочность» или «давление предуплотнения» $S = p_{str}$ [1, 3]. После него значения V_{\max} и V_{\min} убывают, в целом, при неограниченном увеличении давления (Рисунки 2, 5, 7, 9). Отдельные всплески значений будут объяснены ниже.

2 Гипотеза микроструктурного механизма «структурной прочности»

На цикличность скорости изменения силы сопротивления грунта при сдвиге впервые обратил внимание Г.И. Покровский (1937), опираясь на работы П.Х. Пигулевского и Н.Ф. Мищенко [5]. Он связал размеры циклов с размерами структурных элементов, включающих некоторое количество частиц, которые характеризуются «эффективным диаметром».

Позже Н. Я. Денисов качественно обобщил имевшиеся наблюдения: «Для пояснения процесса структурных деформаций и роли пептизации, обусловленной давлением, надо заметить, что под влиянием даже сравнительно небольшого давления, различного для разных пород, появляются поверхности, в пределах которых касательные напряжения больше, чем сопротивление, оказываемое влиянием первичного сцепления и сцепления упрочнения. В связи с неодинаково прочностью связей эти поверхности разделяют породы на агрегаты различной формы и крупности» [6]. Условия деформации, сформулированные Н.Я. Денисовым в общем виде, «характерны для глин, которые под влиянием внешнего давления раскалываются на сравнительно крупные блоки, смещающиеся относительно друг друга» [6].

Предположим, на основе изложенных наблюдений, что:

1) цикличность скорости деформации отражает перестройку микроструктуры грунта, но не переупаковку отдельных частиц, а перемещения блоков грунта по поверхностям скольжения. Уменьшение скорости деформации до значений V_{\min} вызвано упругим сопротивлением грунта, а увеличение скорости до значений V_{\max} – смещением блоков грунта, на границах которых касательные напряжения больше, чем сопротивление скольжению;

2) упругая деформация происходит во всём напряженном объёме грунтового тела, а неупругая – на площадках скольжения, расположенных на поверхности максимальных касательных напряжений.

Действительно, значения V_{\max} увеличиваются с ростом давления на образец, что объясняется увеличением длины поверхностей скольжения. Значения V_{\min} мало изменяются с ростом давления на образец, что подтверждает предположение об упругом сопротивлении, которое зависит от свойств поверхности элементов микроструктуры, которые не изменяются при увеличении давления.

«Уже при незначительных деформациях достигается предел упругости контактных связей, и начинаются необратимые сдвиги частиц» [7]. Упругое сопротивление вызывает уменьшение скорости деформации. В местах концентрации напряжений – на наиболее крупных минеральных зёрнах, контактирующих со штампами прибора, - касательные напряжения достигают предела прочности контактов между частицами и вызывают местные сдвиги на ограниченных площадках скольжения, сопровождающиеся увеличением скорости деформации. Эти площадки ограничены наиболее крупными минеральными зёрнами, расположенными глубже первых. При увеличении внешнего давления эти зёрна также становятся концентраторами упругих напряжений и способствуют развитию площадок скольжения, теперь уже - на большем расстоянии от штампов прибора.

Объединение группы таких площадок приводит к образованию поверхностей скольжения и выделению ими блоков скольжения, что выражается в ускорении деформации образца. Образование блоков скольжения начинается при малых значениях давления и проходит несколько циклов до «структурной прочности» P_{str} .

При компрессионном испытании образец грунта сжимается с двух сторон: верхним и нижним штампами. Поверхности скольжения в нём развиваются в двух противоположных направлениях, под углом к направлению действия сжимающей силы. При некотором значении этой силы происходит слияние компланарных поверхностей скольжения, развивающихся от противоположных штампов. В момент слияния хотя бы двух противоположенных поверхностей скольжения скорость деформации резко возрастает до значения $\max V_{\max}$. Этот момент фиксируется как достижение «структурной прочности» P_{str} .

На Рисунке 3 показано разрушение боковой плоской грани образца при одноосном сжатии. Видны крайние поверхности скольжения, идущие от противоположных штампов, которые пересеклись при давлении, большем, чем P_{str} .

Дальнейшее продвижение площадок скольжения требует накопления упругой энергии за счёт увеличения внешней нагрузки, что отражается в новом цикле деформации. Каждый цикл деформации отражает продвижение площадок скольжения от места приложения внешней нагрузки вглубь образца грунта, при этом часть площадок скольжения образует поверхности скольжения, а часть перестаёт существовать или участвует в последующем дроблении выделившихся блоков скольжения. Эти процессы проявляются как снижение, в общем, значений V_{\min} и V_{\max} при $S > P_{str}$.



Рисунок 3 – Поверхности скольжения (слева) идут от торцов и пересекаются в средней по высоте части образца

Отдельные всплески значений V_{\max} вызваны, вероятно, вторичным разрушением наиболее крупных блоков образца тотальными поверхностями скольжения. Наиболее крупные блоки воспринимают возросшее давление $S > p_{str}$, и в них повторяются процессы развития поверхностей скольжения, в том числе, образование тотальных поверхностей с высокими скоростями деформации.

3 Анализ результатов определения «структурной прочности»

Циклы деформации являются отражением разрушений микроструктуры грунта, причём не после преодоления «структурной прочности», а с начала нагружения образца, о чём свидетельствуют скачки скорости деформации.

Разрушения происходят путём сдвига по поверхностям скольжения, имеющим, по-видимому, макроскопические размеры, иначе они не регистрировались бы прибором.

Скорость сдвига V_{\max} в цикле деформации изменяется с увеличением давления очень неравномерно, что указывает на разные формы разрушения: пластической деформацией и ползучестью по поверхностям скольжения. Поскольку значения V_{\max} проходят через $\max V_{\max}$, то можно предположить, что разрушение происходит локальными поверхностями скольжения – до p_{str} , локальными и тотальными – после p_{str} , и первая тотальная поверхность скольжения (через всё вертикальное сечение образца) образуется при $\max V_{\max}$. Тогда давление «структурной прочности» получает объяснение, как момент разрушения образца первой сквозной поверхностью скольжения. Таких поверхностей может быть несколько, как на Рисунках 2 и 7.

Каждому сдвигу по поверхностям скольжения предшествует упругая деформация, проявляющаяся снижением скорости осадки до значения V_{\min} . Значения V_{\min} мало изменяются во всём диапазоне давлений. Коэффициент вариации для испытанных образцов лежит в пределах 0,18-0,30. Это подтверждает предположение об упругой природе сопротивления грунта на нисходящей ветви цикла. Скорость деформации на ней стабильна, так как определяется свойствами глинистых минералов, составляющих связную матрицу микроструктуры грунта.

Нет оснований считать, что при давлении грунт $S < p_{str}$ не сжимается. Происходит частичное разрушение микроструктуры грунта локальными поверхностями скольжения, идущими от торцов и охватывающее часть высоты образца, а потому дающее малую интегральную деформацию. Когда разрушение поверхностями скольжения охватывает весь образец, осадка заметно возрастает из-за увеличения их числа, но скорость осадки падает, потому что поверхности скольжения становятся короче: идёт дробление образовавшихся блоков. Только разрушение крупных блоков может вызвать резкое локальное увеличение скорости осадки.

Таблица 2 – Микроструктурные характеристики грунтов

Индекс образца	n_c-n_o	p_{str} кПа	p_{crum} кПа
1	2	3	4
118	2	34	18
3	0	2	2
51	4	64	29
61	6	52	8
5	2	49	19

С начала нагружения образца скорость осадки резко увеличивается от нуля до значений, характерных для интервала $[0 ; p_{str}]$. При этом значения осадки малы. Очевидно, что здесь, при давлении p_{crum} в единицы килопаскалей, происходит смятие шероховатостей торцов образца, и данные испытания на интервале $[0 ; p_{crum}]$ не могут рассматриваться как отражение свойств грунта. Назовём p_{crum} «давлением смятия». Анализ скорости осадки, вычисленной на малом интервале давления, позволяет точнее, чем при ступенчатом нагружении, определить значения p_{str} и p_{crum} .

Выводы

1. Осадка образца грунта при компрессионном сжатии постоянно возрастающим давлением увеличивается неравномерно, а «скорость» осадки изменяется циклически. Максимальные амплитудные значения в циклах деформации возрастают до максимума $\max V_{max}$ при некотором значении давления, которое является «структурной прочностью» p_{str} грунта.

2. Перелом графика осадки образца при p_{crum} вызван смятием шероховатостей торцов образца, как показывает анализ «скорости» осадки.

3. Анализ записи «скорости» деформации позволяет более чётко определить значение «структурной прочности» грунта, чем известными ранее способами, основанными на форме компрессионной кривой.

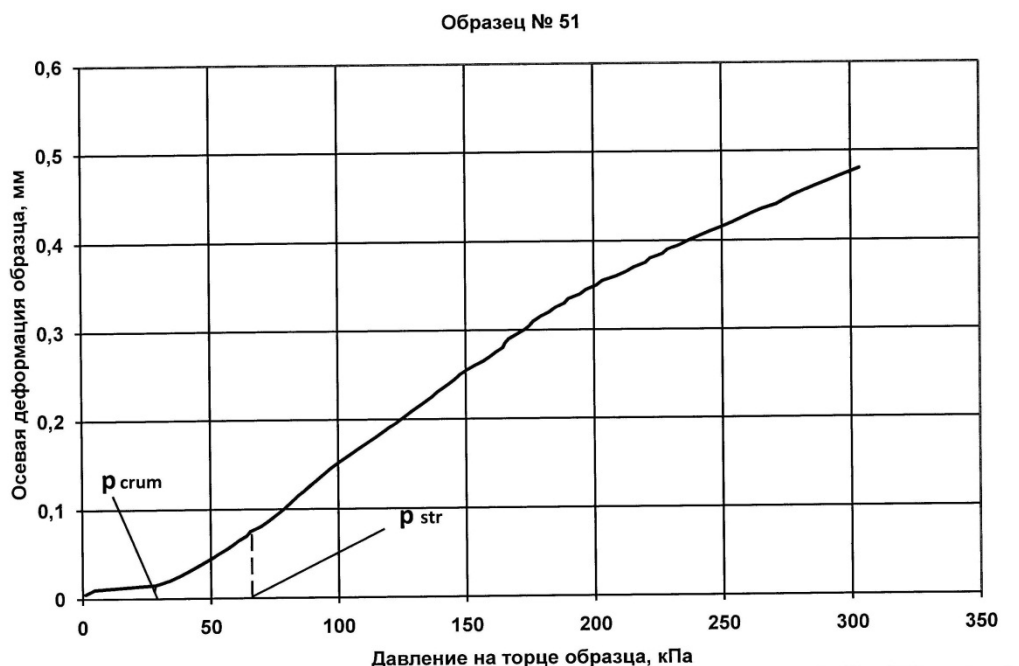


Рисунок 4 – График изменения осадки образца № 51 при компрессионном сжатии постоянно возрастающим давлением

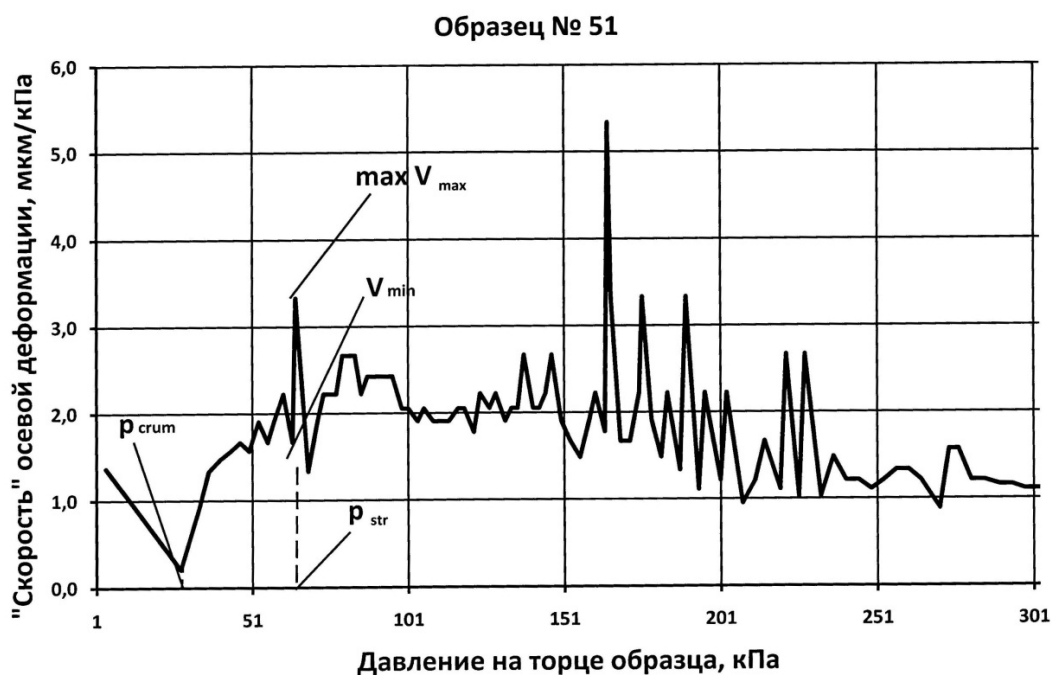


Рисунок 5 – График «скорости» осадки образца № 51

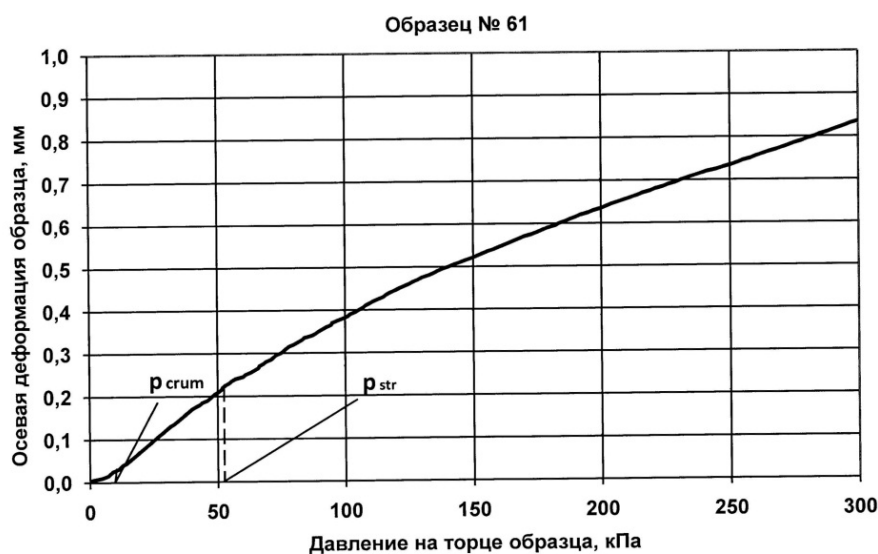


Рисунок 6 – График изменения осадки образца № 61 при компрессионном сжатии постоянно возрастающим давлением

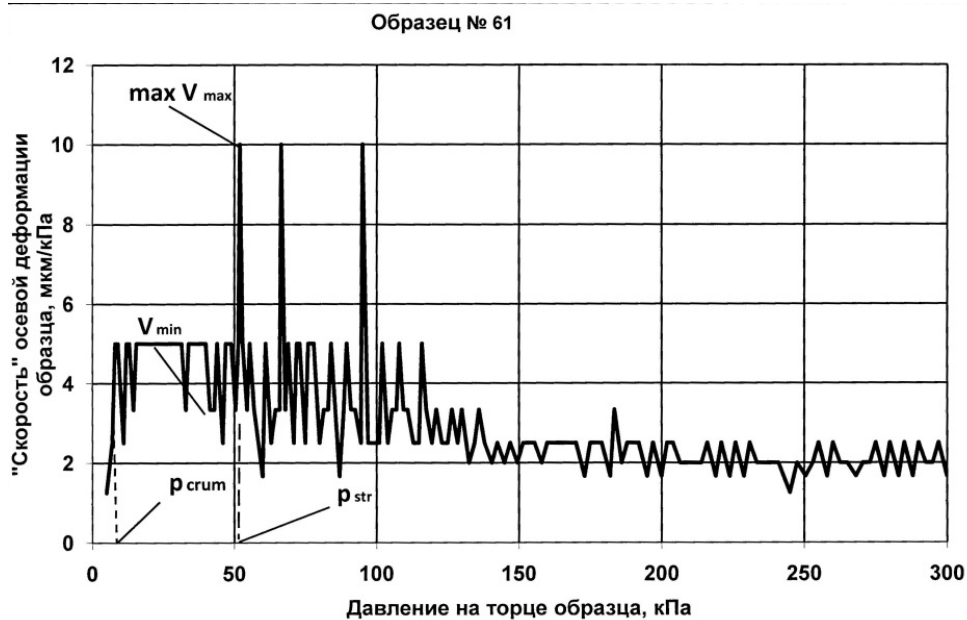


Рисунок 7 – График «скорости» осадки образца № 61

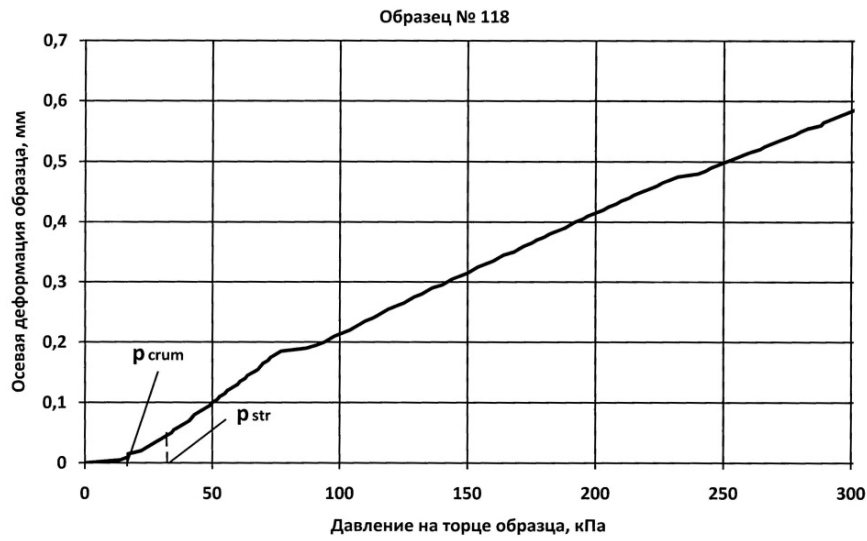


Рисунок 8 – График изменения осадки образца № 118 при компрессионном сжатии постоянно возрастающим давлением

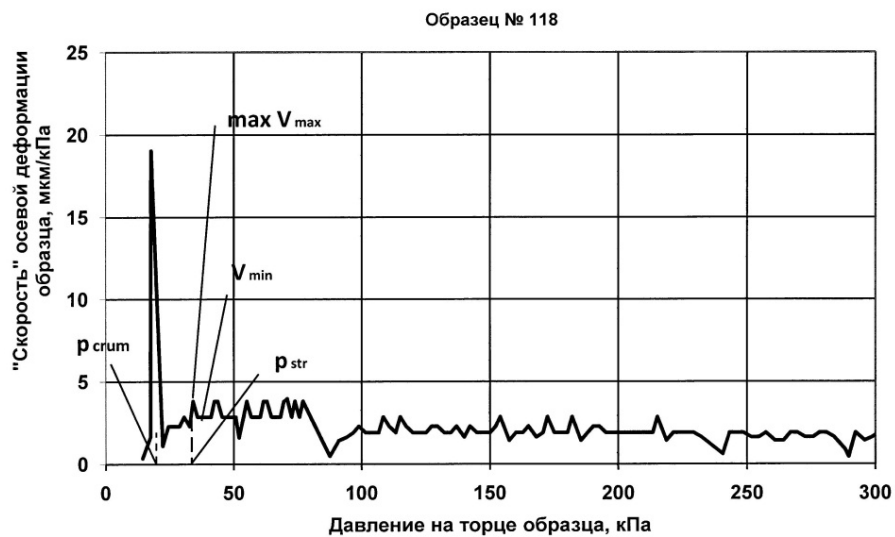


Рисунок 9 – График «скорости» осадки образца № 118

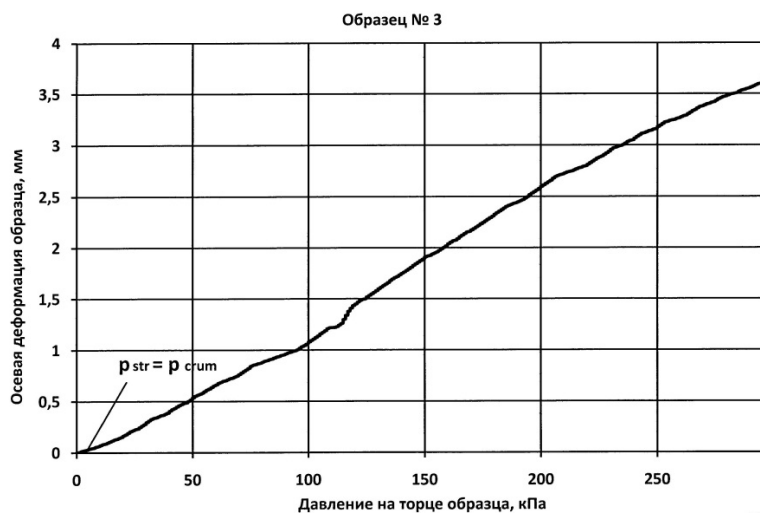


Рисунок 10 – График изменения осадки образца № 3 при компрессионном сжатии постоянно возрастающим давлением

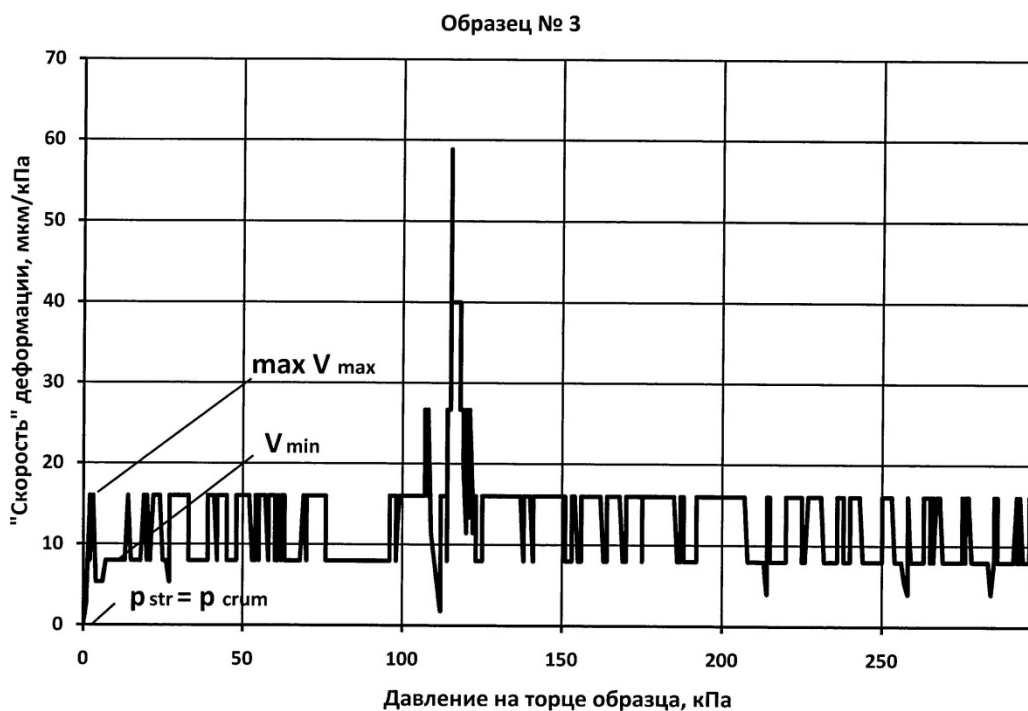


Рисунок 11 – График «скорости» осадки образца № 3

Литература

1. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс). – М.: Высш. школа, 1983. – 288 с.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высш. школа, 1978. – 447 с.
3. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. – М.: Изд-во АСВ, 2005. – 488 с.
4. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Определение структурной прочности грунтов постоянно возрастающей нагрузкой. Депонир. во ВНИИНТПИ, № 11408, 1993.
5. Покровский Г.И. Исследования по физике грунтов. – М.-Л.: Гл. ред. строит. лит., 1937.
6. Денисов Н.Я. О природе прочности глинистых пород. В кн.: Природа прочности и деформаций грунтов. – М.: Стройиздат, 1972. – 279 с.
7. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов: (Напряженно-деформативные и прочностные характеристики). – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.