МЕХАНІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

УДК 631.431

М. Д. ПОДСКРЕБКО

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ

Белорусский государственный аграрный технический университет

(Поступила в редакцию 17.02.2010)

Развитие теории почвообработки, применение инженерных методов в практике расчета силового взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих машин с почвой, определение деформаций и перемещений, возникающих в почве при воздействии на нее различных деформаторов, связано со знанием таких механических характеристик почвы, как модуль деформации почвы E, коэффициент Пуассона μ, пределы прочности на растяжение $\sigma_{вр}$ и сжатие $\sigma_{вс}$, предел пропорциональности $\sigma_{пц}$, которые определяются опытным путем. Разработанной методики для определения этих характеристик почвы до настоящего времени не имеется.

Чтобы механические характеристики, полученные для различных почв были сравнимыми, испытания должны проводиться по единой методике на образцах одинаковой формы и размеров.

Выбор размеров и формы образцов для получения диаграммы растяжения почвы. Механические характеристики почвы, как и механические характеристики металлов (модуль упругости, коэффициент Пуассона, пределы прочности, пропорциональности, текучести), должны определяться из диаграммы растяжения почвы, для получения которой необходимо обосновать размеры и форму образцов, методику проведения испытаний.

Опыты с металлами показывают, что у хрупких металлов образцы удлиняются до разрушения равномерно по всей длине, у пластичных образцы перед разрушением претерпевают значительные местные деформации с образованием характерной шейки.

Обозначим удлинение образца, деформирующегося равномерно, через Δl, а длину – через l_0. Тогда относительная деформация образца будет определяться по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \qquad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что относительное удлинение не зависит от начальной длины образца l_0, так как удлинение Δl будет расти пропорционально l_0.

Для таких металлов величина ε будет иметь постоянное значение, независимо от длины l_0. Если при растяжении образца возникает шейка, то полное удлинение можно представить состоящим из равномерного удлинения $\Delta l_р$ части образца и удлинения $\Delta l_ш$ шейки

$$\Delta l = \Delta l_р + \Delta l_ш$$

или

$$\Delta l = \varepsilon_р l_0 + \Delta l_ш, \qquad (2)$$

где $\varepsilon_р$ – равномерное относительное удлинение.

Полное относительное удлинение образца будет определяться выражением

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\varepsilon_р l_0}{l_0} + \frac{\Delta l_ш}{l_0} = \varepsilon_р + \frac{\Delta l_ш}{l_0}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что величина относительного удлинения ε зависит от длины l_0, поэтому для таких металлов величина ε будет меняться от длины l_0. В этом случае, чтобы получить сравнимые значения ε, испытания нужно проводить с образцами постоянной формы и размеров.

Опыты на растяжение квадратных образцов связных почв показывают, что почвы деформируются до разрыва равномерно [1, 2]. Тензометры Мартенса, закрепляемые на различной высоте по длине образца почвы, показывали практически одинаковое удлинение.

Таким образом, размеры и форма почвенных образцов должны определяться удобством получения самого образца и расположением его в разрывной машине. Получение круглых образцов связано со значительными трудностями. Практика проведения испытаний показала, что самой удобной формой образца является квадратная, размером 100×100 мм, расчетная длина также 100 мм. Такие образцы удобно получать с помощью специального приспособления (рис. 1, *а*), которое состоит из верхнего и нижнего захватов и двух боковин, жестко соединяющихся четырьмя болтами с захватами. Для взятия образца приспособление накладывается на почву, и почва подрезается вокруг острым ножом. Когда приспособление погрузится в почву полностью, образовавшийся столбик и извлекается из почвы. Образцы почвы брали приспособлением как непосредственно на поле, так и в лабораторных условиях из почвенных монолитов.

Отвернув восемь винтов, снимают боковины. Образец почвы с расчетной длиной 100 мм оказывается зажатым в захватах, которые специальными вырезами закрепляются в разрывной машине для получения диаграммы растяжения (рис. 1, *б*).

На рис. 1, *в* показан чертеж приспособления.

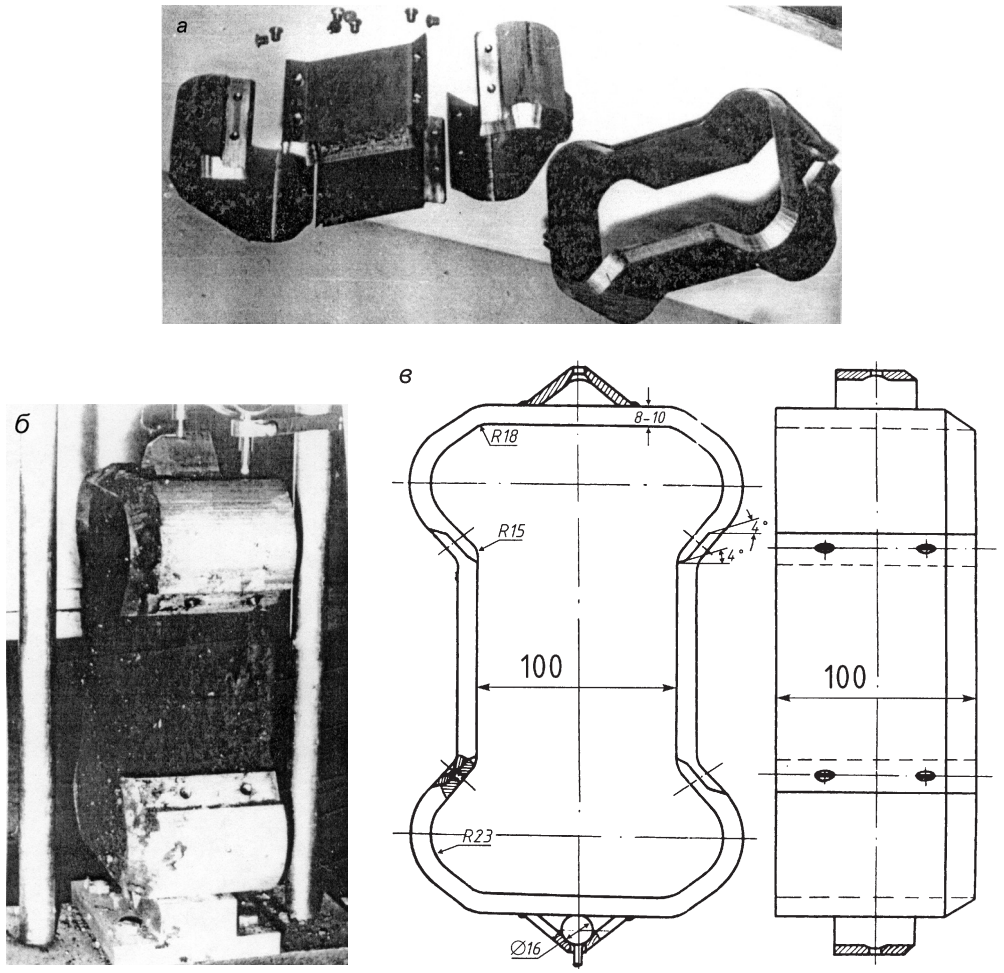

Рис. 1. Приспособление для взятия образцов почвы в собранном и разобранном виде (*а*); образец почвы, расположенный в захватах разрывной машины (*б*); чертеж приспособления (*в*)

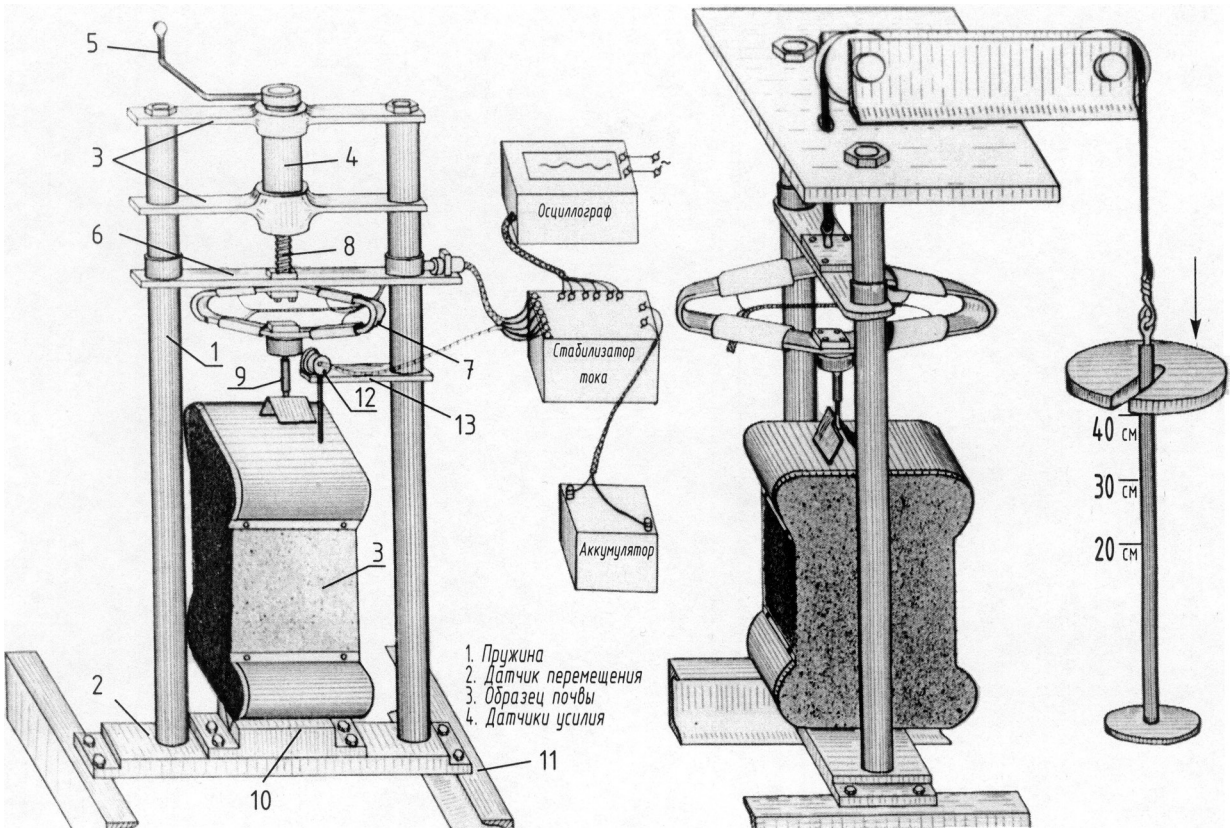

Рис. 2. Разрывная машина

Разрывная машина (рис. 2) состоит из двух направляющих *1*, закрепленных внизу на основании *2*. В верхней части направляющие соединяются двумя траверсами *3*, в которых на подшипниках вращается гайка *4*. Вращение гайки осуществляется рукояткой *5*. По направляющим скользит подвижная траверса *6*, с которой соединены силоизмерительная пружина *7* и винт *8*. Тяга *9* шаровыми шарнирами соединяет силоизмерительную пружину с верхним захватом образца почвы. На основании *2* закреплена призма *10*, посредством которой нижний захват образца почвы соединяется с основанием. Для устойчивости разрывная машина установлена на двух швеллерах *11*. Запись удлинения образца осуществляется тензометрическим датчиком перемещений *12*, закрепленном на кронштейне *13*, который может крепиться винтом *13* в любом месте на направляющей *1*. Для записи усилия на силоизмерительную пружину наклеивали 8 тензорезисторов, собранных в мост. Тензометрический датчик перемещения представляет реахорд и собран на базе индикатора часового типа.

При вращении рукоятки *5* перемещается траверса *6*, развивающееся при этом усилие в силоизмерительной пружине и удлинение образца записываются на пленку осциллографа. Одновременно на пленку наносятся отметки времени. Определение диаграмм растяжения почвы проводили в полевых и лабораторных условиях.

Порядок проведения исследований. Образец почвы вместе с приспособлением для взятия образцов устанавливается и закрепляется нижним захватом на основании *10*. Верхний захват тягой *9* соединяется с силоизмерительной пружиной, после чего вращением рукоятки выводят «зайчик» на экране осциллографа на нулевую линию, отворачивают восемь винтов, снимают боковины и освобождают образец почвы. К верхнему захвату приспособления подводится датчик перемещения *12* и зажимается кронштейном *13* на направляющей *1*.

Опыты показали, что с помощью винтового привода можно получить скорость растяжения образца не больее 60 мм/с.

Для изучения механических характеристик почвы в условиях динамического нагружения винтовой привод у разрывной машины заменяли на привод посредством падающего груза.

При обработке осциллограмм из графика усилий исключался вес верхнего захвата с находящейся в нем почвой.

Полученные диаграммы растяжения, которые представляют график зависимости между силой F, действующей на образцы, и его удлинением Δl, перестраиваются в диаграмму σ–ε (напряжение–деформация). Для этого ординаты умень-шаются в A_0 раз, а абсциссы в l_0 раз (где A_0 и l_0 – площадь поперечного сечения и расчетная длина образца до нагружения соответственно).

На рис. 3 приведена диаграмма растяжения почвы, представляющей выщелоченный чернозем среднесуглинистого механического состава, из которой следует, что до определенной нагрузки деформации образца почвы носят упругий характер. На этом участке деформации увеличиваются пропорционально напряжениям. Эта линейная зона у почв незначительна, и уже при напряжениях 0,25–0,4 Н/см^2 появляются остаточные деформации.

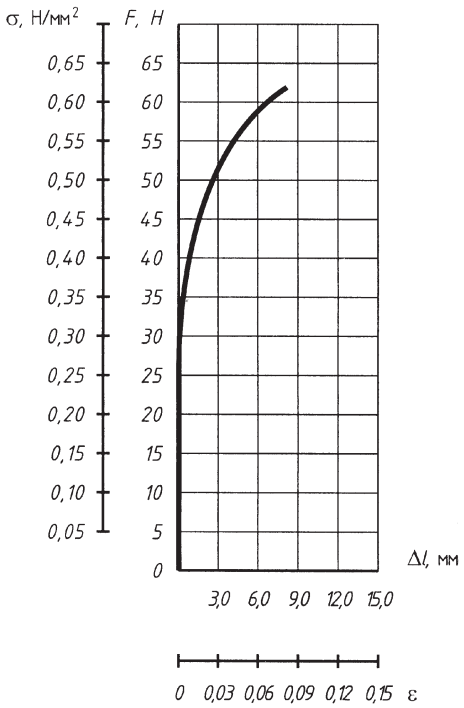

Рис. 3. Диаграмма растяжения почвы (выщелочный чернозем среднесуглинистого механического состава)

Определение коэффициента Пуассона и модуля деформации почв при сжатии. Коэффициент Пуассона представляет абсолютную величину отношения поперечной деформации ε′ к продольной деформации ε в пределах пропорциональности:

$$\mu = \left|\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right|. \qquad (4)$$

Это отношение у твердых тел и линейно-деформируемых материалов, к которым относятся почвы при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности, остается величиной постоянной.

Рассмотрим сжатие элементарного параллелепипеда почвы под действием равномерно распределенного давления p при невозможности бокового расширения (рис. 4).

В этом случае на гранях элементарного параллелепипеда будут действовать главные напряжения σ_x, σ_y, σ_z. Знаки напряжений и деформаций принимаются положительными при сжатии образца почвы. Деформации в направлении осей x и y будут равны нулю.

Суммарные относительные деформации по осям x, y, z при линейной зависимости между напряжениями и деформациями, согласно закону Гука, будут выражаться следующими формулами:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \mu\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right]; \qquad (5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \mu\left(\sigma_x + \sigma_z\right)\right]; \qquad (6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \mu\left(\sigma_x + \sigma_y\right)\right]. \qquad (7)$$

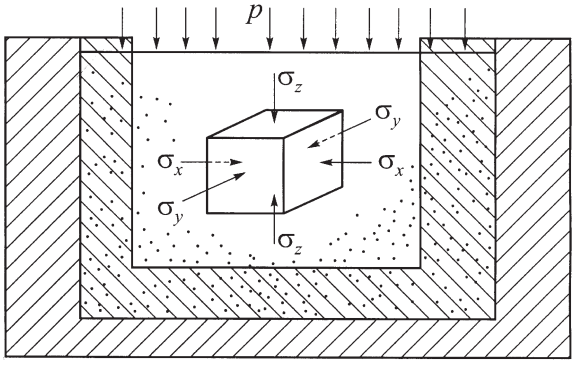

Рис. 4. Сжатие элементарного параллелепипеда почвы под действием равномерно распределенного давления P при невозможности бокового расширения

Приравнивая ε_y и ε_x нулю, получим

$$\varepsilon_x = \mu\left(\sigma_y + \sigma_z\right); \qquad (8)$$

$$\varepsilon_y = \mu\left(\sigma_x + \sigma_z\right). \tag{9}$$

Решая совместно уравнения (8) и (9), найдем для σ_x и σ_y выражения

$$\sigma_x = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_z; \tag{10}$$

$$\sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_z \tag{11}$$

или

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_z. \tag{12}$$

Так как $\sigma_z = p$, то окончательное выражение примет следующий вид:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu}p. \tag{13}$$

Величина $\frac{\mu}{1-\mu}$ характеризует отношение горизонтального давления к вертикальному при невозможности бокового расширения и называется в механике грунтов коэффициентом бокового давления [5]:

$$\varsigma = \frac{\mu}{1-\mu}. \tag{14}$$

Обозначая напряжения ($\sigma_x = \sigma_y$) через q, можно записать

$$q = \varsigma p \tag{15}$$

(q – боковое давление на стенку, Н/см^2).

Из уравнения (15) следует, что увеличение вертикального давления на горизонтальную площадку при невозможности бокового расширения вызовет пропорциональное увеличение горизонтального давления на вертикальную площадку.

Уравнение (15) в общем виде можно представить в дифференциальной форме

$$dq = \varsigma dp. \tag{16}$$

Интегрируя уравнение (16), получим

$$q = \varsigma p + c, \tag{17}$$

где c – постоянная интегрирования определяемая из начальных условий.

Уравнение (17) показывает, что в координатах q и p величина ς представляет угловой коэффициент прямой c с осью p.

Постоянная c будет равна величине отрезка, отсекаемого прямой на оси q. Коэффициент бокового давления q будет зависеть от типа почвы, ее влажности и механического состава.

Для экспериментального определения коэффициента бокового давления необходимо с помощью тензометрирования или любым другим способом одновременно произвести замеры вертикального и бокового давлений, действующих на образец. По полученным данным строится график зависимости бокового давления q от осевого давления p. Все экспериментальные точки должны укладываться на прямой, тангенс угла наклона которой к оси p будет равен, согласно формуле (17), коэффициенту бокового давления ς. Зная ς, по формуле (18) определяем коэффициент Пуассона для данной почвы:

$$\mu = \frac{\varsigma}{1-\varsigma}. \tag{18}$$

Определяя в процессе испытания относительную деформацию ε_z вдоль оси z, модуль деформации при сжатии можно определить, используя формулу (7).

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - 2\mu\sigma), \tag{19}$$

где $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$.

Обозначим $(\sigma_z - 2\mu\sigma)$ через $\sigma_{\text{прив}}$. Тогда уравнение (19) примет такой вид:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\sigma_{\text{прив}}. \tag{20}$$

Уравнение (20) представляет прямую линию. Построив в координатах ε_z, $\sigma_{\text{прив}}$ по опытным точкам прямую и определив тангенс угла наклона ее к оси $\sigma_{\text{прив}}$ $\left(\text{tg}\alpha = \frac{1}{E}\right)$, найдем величину модуля деформации почвы при сжатии

$$E = \frac{1}{\text{tg}\alpha}, \tag{21}$$

(α – угол наклона прямой к оси $\sigma_{\text{прив}}$).

Определять коэффициент Пуассона, модуль деформации почвы при сжатии можно с помощью прибора для компрессионных испытаний образцов грунта типа К–1, оборудовав его тензометрической аппаратурой для замеров бокового и вертикального давлений и перемещения поршня при сжатии почвенного образца.

Методика определения механических характеристик почвы. Методика распространяется на глинистые, суглинистые и супесчаные почвы естественной структуры. Определению подлежат: модуль деформации (упругости) почвы E при растяжении и сжатии, предел текучести $\sigma_т$ и пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$, предел прочности $\sigma_{\text{вр}}$ на растяжение и $\sigma_{\text{вс}}$ на сжатие, коэффициент Пуассона μ. Методика не распространяется на малосвязные, песчаные почвы, из которых нельзя вырезать почвенные образцы в виде монолитов.

Данная методика апробирована в Челябинском институте механизации и электрификации сельского хозяйства (ЧИМЭСХ), теперь ЧГАИУ.

Общие указания
1. Механические характеристики почвы как материала определяются для изучения процессов разрушения почвы и расчета рабочих органов почвообрабатывающих машин. Средние значения модуля деформации (упругости), предела пропорциональности, предела прочности почвы при растяжении были вычисленные как среднее арифметическое из 8 испытанных образцов: E = 175 Н/см^2, $\sigma_{\text{пц}}$ = 0,36 Н/см^2, $\sigma_{\text{вр}}$ = 0,63 Н/см^2, влажность в слое 0–20 см = 17,5% , твердость в слое 0–20 см = 210 Н/см^2
2. Модулем деформации (упругости) почвы называется коэффициент пропорциональности в пределах линейной зависимости между напряжением и деформацией
3. Коэффициентом Пуассона называется абсолютная величина отношения относительной поперечной деформации к относительной продольной деформации в пределах линейной зависимости между напряжением и деформацией
4. Пределом пропорциональности называется напряжение, при котором начинается расхождение диаграммы растяжения с продолжением ее прямолинейного участка. Это наибольшее напряжение, до которого наблюдается линейная зависимость между напряжением и деформацией
5. Пределом текучести называется напряжение, при котором тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс увеличивается на 150% или приращение перемещения увеличивается на 150% по отношению к линейному приращению перемещения
6. Пределом прочности называется напряжение, соответствующее наибольшей разрушающей нагрузке в процессе испытаний
Размеры и форма почвенных образцов
7. Образцы представляют почвенные монолиты в форме прямоугольных параллелепипедов размером 100×100×100 мм
8. В поле из пласта почвы со снятым верхним (толщиной около 5 см) задернелым слоем с помощью специального приспособления (см. рис. 1) вырезаются почвенные образцы. Одновременно определяется твердость почвы и берутся образцы для определения влажности и коэффициента Пуассона
9. Для определения механических характеристик почвы на поле отбираются не менее 6–8 образцов

Оборудование для испытания
10. Испытание образцов желательно проводить на разрывной машине малой мощности 50 кгс с электронным управлением, имеющей устройство для автоматического вычерчивания диаграммы растяжения
11. Испытательная машина должна обеспечивать плавность нагружения в пределах 10 мм/мин, точность замера нагрузок — не более 0,5 Н
12. Температура в лаборатории должна быть в пределах 16±4,0°. Влажность воздуха – нормальная
13. Определение коэффициента Пуассона рекомендуется проводить согласно рис. 4. Можно использовать прибор для компрессионных испытаний грунта
Проведение испытания
14. Провести обмер образца с точностью до 1 мм. Поперечное сечение образца A_0 определяется как среднее арифметическое из измерений в трех горизонтах
15. Установить образец в захватах разрывной машины. Подвести к верхнему захвату приспособления датчик для замера перемещений
16. Приложить предварительную нагрузку, соответствующую напряжению, равному $0{,}1\sigma_{пц}$. Установить все измерительные приборы на нулевую отметку и получить запись диаграммы растяжения образца почвы
Обработка опытных данных
17. Перестроить диаграмму растяжения, представляющую график зависимости между силой (F), действующей на образец, и его удлинением Δl, в диаграмму σ–ε (напряжение–деформация). Для этого ординаты уменьшаются в A_0 раз, а абсциссы – в l_0 раз (где A_0 и l_0 – площадь поперечного сечения и расчетная длина образца до нагружения соответственно)
18. Определить по диаграмме растяжения величину нагрузки, соответствующей пределам пропорциональности, текучести, прочности
19. Определить коэффициент Пуассона и модуль деформации при сжатии
20. Вычислить механические характеристики почвы как среднее арифметическое из испытанных образцов почвы (не менее 6–8 образцов)

Выводы

1. Все диаграммы «напряжение – деформация», вычисленные для одной скорости, подобны.

2. Диаграммы растяжения почв до определенной нагрузки образца носят упругий характер. Эта линейная зона у почв незначительна, при напряжениях 0,25–0,40 Н/см^2 появляются остальные деформации.

3. Коэффициент Пуассона у твердых тел и линейно деформируемых материалов, к которым относятся почвы, при напряжениях меньше предела пропорциональности, величина постоянная. Рассматривая сжатие элементарного параллелепипеда при невозможности бокового расширения, определяют коэффициент бокового давления, по которому находят коэффициент Пуассона и модуль деформации почвы.

Литература

1. П о д с к р е б к о, М. Д. Определение коэффициента Пуассона и модуля деформации почв / М. Д. Подскребко // Тр. ЧИМЭСХ. – 1967. – Вып. 26.

2. П о д с к р е б к о, М. Д. Выбор формы образцов для определения механических характеристик почв / М. Д. Подскребко // Тр. ЧИМЭСХ. – 1967. – Вып. 26.

3. Л у к а н и н, Ю. В. Методика определения механических свойств почвы. Исследование и усовершенствование почвообрабатывающих машин / Ю. В. Луанин // Материалы НТС ВИСХОМ. – Вып. 27. – М., 1970.

4. П о д с к р е б к о, М. Д. Обоснование оптимальной скорости обработки почвы / М. Д. Подскребко // Повышение рабочих скоростей тракторов и с.-х. машин. – М., 1963.

5. Р о з а, С. А. Механика грунтов / С. А. Роза. – М.: Высшая школа, 1962.

M. D. PODSKREBKO

THEORY AND PRACTICE OF IDENTIFYING MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SOIL

Summary

The theory and practice of identifying mechanical characteristics (stress strain, Poisson ratio, proportionality limits, yielding points, strength limits) are worked out. The device for taking soil samples is proposed.