

*РАЗМЫСЛОВИЧ И. Р.,
кандидат технических наук;
СТАШИНСКИЙ Р. С.,
инженер*

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РУЗРУШЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПЛАСТА СЖАТИЕМ ПРИ УБОРКЕ КАРТОФЕЛЯ

Исходным материалом, подлежащим переработке в картофелеуборочной машине, является картофельная грядка. Последняя характеризуется неоднородностью входящих в нее компонентов, которыми являются почва, картофельные клубни, ботва или ее остатки, столоны, остатки сорной растительности, камни. Состав, свойства и количественное соотношение этих компонентов существенно влияют на качество работы машины и определяют параметры и режимы рабочих органов этой машины. На долю почвы приходится 97—98% от веса пласта грядки, подкапываемого машиной, следовательно, в исходном материале почва является основной примесью, подлежащей отделению.

Наиболее простыми по устройству и надежными в работе являются сепарирующие устройства картофелеуборочных машин, позволяющие отделять клубни от почвы по размерным признакам. Однако, чтобы добиться стопроцентного разделения их по этим признакам, предварительно необходимо обеспечить полное разрушение всех почвенных комков, размеры которых превышают размеры клубней или соизмеримы с ними. В данном случае полным разрушением почвенных комков считается их разрушение до распада на агрегаты, размеры которых меньше, чем размеры наименьших хозяйственнопригодных клубней.

Размеры, прочность и процентное количество комков в подкапываемом пласте зависят от физико-механического состава почвы, вида предпосевной обработки почвы, количества и вида обработок в период роста, погодно-климатических условий и многих других факторов.

Степень влияния этих факторов в значительной мере определяется местом расположения почвенных комков в картофельной грядке. Исследования Н. М. Кагдаулова [3] показали, что наибольшее сопротивление разрушению оказывают почвенные комки, расположенные в верхней и нижней частях сечения подкапываемого пласта.

Процесс разрушения почвенного пласта при сжатии следует рассматривать как двухфазный процесс. В первой фазе его происходит нарушение монолитности пласта, связанное с пере-

мещением отдельных структурных агрегатов в результате нарушения связей между ними. Вторая фаза связана с разрушением крупных почвенных комков в результате их перенапряжения.

Согласно механике грунтов скорость деформации во второй фазе ниже, чем в первой. Так как в период уборки картофеля влажность почвы обычно ниже капиллярной влагоемкости, то связи между отдельными структурными агрегатами гораздо слабее, чем прочность самих агрегатов. Следовательно, работа, затрачиваемая на первую фазу разрушения, ниже, чем на вторую. При сжатии пласта в отдельных точках его возникают как нормальные, так и касательные напряжения. При этом первые сближают отдельные частицы, вызывая упрочнение пласта. Вторые же, наоборот, вызывают относительные перемещения агрегатов и разрушение их. Однако обеспечить полное разрушение пласта приложением лишь сдвигающих нагрузок невозможно без одновременного приложения и нормальных нагрузок, так как это разрушение всех комков возможно лишь при наличии контактов между отдельными частицами и агрегатами.

Разрушение почвенного пласта сжатием осуществимо как при возможности бокового расширения этого пласта (линейное сжатие), так и при невозможности его (объемное сжатие). Кроме того, допускается случай с ограниченной возможностью бокового расширения, например, когда боковому расширению пласта препятствуют прилегающие к нему смежные слои грунта.

Разрушение отдельных почвенных комков при линейном сжатии в достаточной мере изучено многими исследователями (В. С. Митрофановым, И. М. Полуночевым и др.). В результате (в основном экспериментально) получен ряд закономерностей, позволяющих установить оптимальные параметры рабочих органов, которые используют данный принцип. Однако применение данного принципа возможно только после сепарации мелких частей почвы. Примером могут служить комкодавящие баллоны, которые в силу ряда присущих им недостатков не обеспечивают полного разрушения всех почвенных комков.

Сжатие пласта при ограниченной возможности бокового расширения можно производить при разрушении грядки до подкапывания.

Использование объемного сжатия наиболее целесообразно при разрушении почвенного пласта картофельной грядки в момент ее подкапывания или между подкапыванием и сепарацией. В случае объемного сжатия возникает наиболее вероятная возможность создать значительные напряжения во всех точках разрушаемого пласта. Сам процесс распределения напряжений по различным точкам сжимаемого слоя является очень сложным, поскольку степень ограничения бокового расширения отдельных комков зависит от места расположения их относительно повер-

ностей приложения нагрузок и ограничительных поверхностей. Чем больше расстояние между комком и названными поверхностями, тем больше возможность бокового расширения данного комка при сжатии.

Согласно механике грунтов [1] со стороны поверхностей, препятствующих боковому расширению, на пласт действуют реакции этих поверхностей, равные боковому давлению пласта на них. Величина этого давления определяется выражением

$$q = p \xi, \quad (1)$$

где q — боковое давление;

p — давление от приложенной нагрузки;

ξ — коэффициент бокового давления.

Коэффициент ξ показывает степень приращения бокового давления в зависимости от приращения нагрузки и зависит от физико-механических свойств почвы. Проф. В. А. Флорин [5], ссылаясь на экспериментальные данные, указывает, что при небольших нагрузках коэффициент бокового давления изменяется, а при значительных нагрузках практически остается неизменным. Между коэффициентом бокового давления и коэффициентом Пуассона (μ) существует взаимосвязь

$$\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (2)$$

По данным ЦНИИМЭСХ, для глинистых почв коэффициент Пуассона равен 0,3. Следовательно, коэффициент бокового давления для этих почв равен 0,43.

Для рассмотрения условий предельного равновесия и разрушения земляных материалов наиболее часто используется теория прочности Мора, связывающая нормальные и касательные напряжения на площадках разрушения функциональной зависимостью

$$\tau = f(\sigma), \quad (3)$$

где τ и σ — касательные и нормальные напряжения.

В механике грунтов данная функция наиболее часто выражается законом Кулона

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

где φ — угол внутреннего трения почвы;

c — коэффициент сцепления, зависящий от свойств почвогрунта и равный касательным напряжениям при $\sigma = 0$.

По данным проф. В. В. Охотина [4], коэффициент внутреннего трения и сцепление грунта (надо полагать и почвы) зави-

сят как от физико-механического состава и влажности грунта, так и от вертикальной нагрузки на этот грунт.

Условие разрушения в случае объемного сжатия определяется зависимостью

$$\max \{ |\tau_{\text{н}}| - \sigma_{\text{н}} \operatorname{tg} \varphi \} \geq c, \quad (5)$$

где $|\tau_{\text{н}}|$ — предельно допустимые касательные напряжения для данной почвы.

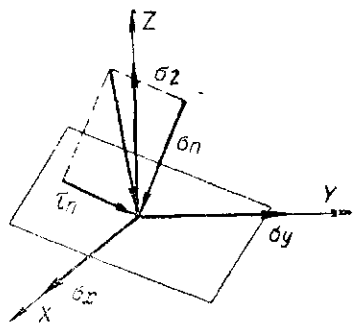


Рис. 1. Напряжения в точке, лежащей на площадке скольжения разрушаемого пласта.

Предположим, что площадка разрушения (скольжения) расположена в прямоугольной системе координат XYZ (рис. 1)

Пусть σ_z , σ_y и σ_x — главные нормальные напряжения в точке, лежащей на площадке скольжения. Предположим, что

$$\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x,$$

тогда полное нормальное напряжение

$$\sigma_{\text{н}} = \sigma_z \cos^2 \alpha_z + \sigma_y \cos^2 \alpha_y + \sigma_x \cos^2 \alpha_x \quad (6)$$

и

$$|\tau_{\text{н}}| = \sqrt{(\sigma_z^2 \cos^2 \alpha_z + \sigma_y^2 \cos^2 \alpha_y + \sigma_x^2 \cos^2 \alpha_x - (\sigma_z \cos^2 \alpha_z + \sigma_y \cos^2 \alpha_y + \sigma_x \cos^2 \alpha_x)^2)}, \quad (7)$$

где α_z , α_y и α_x — углы отклонения нормали к площадке скольжения, от координатных осей.

По В. Г. Березанцеву [2], $|\tau_{\text{н}}| = \sigma_{\text{н}} \operatorname{tg} \varphi$ достигает максимального значения при следующих комбинациях косинусов углов α :

$\cos \alpha_z$	$\cos \alpha_y$	$\cos \alpha_x$
$\pm \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{2}}$	$\pm \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{2}}$	0
$\pm \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{2}}$	0	$\pm \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{2}}$
0	$\pm \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{2}}$	$\pm \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{2}}$

Исходя из данных комбинаций и учитывая, что $\sigma_y = \sigma_x$, условия разрушения пласта при объемной деформации определяют выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} - \operatorname{tg} \varphi \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} &\geq c; \\ \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} - \operatorname{tg} \varphi \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} &\geq c. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Направление линий скольжения относительно направления σ_z определяется выражением

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}, \quad (9)$$

где α — угол между осью OZ и линией скольжения.

Пусть боковое расширение разрушаемого пласта ограничено цилиндрической поверхностью (рис. 2). При этом направление сжимающей равномерно распределенной нагрузки совпадает с

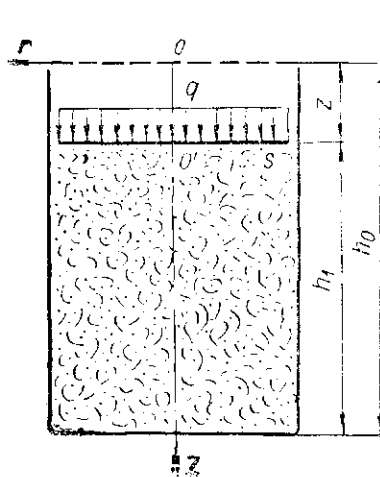


Рис. 2. Ограничение бокового расширения разрушаемого пласта цилиндрической поверхностью.

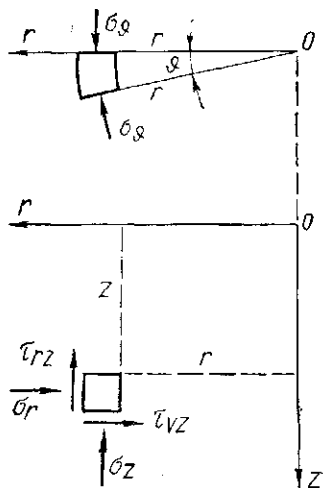


Рис. 3. Объемное напряженное состояние точки в цилиндрической системе координат.

осью цилиндра. В этом случае удобно воспользоваться цилиндрической системой координат $zr\vartheta$. Напряженное состояние точки характеризуется в этом случае составляющими напряжений (рис. 3):

σ_z — осевое нормальное напряжение;
 σ_r — радиальное нормальное напряжение;
 σ_θ — кольцевое нормальное напряжение;
 $\tau_{rz}, \tau_{\theta z}, \tau_{r\theta}$ — касательные напряжения.

Так как деформация симметрична, то

$$\tau_{\theta z} = \tau_{r\theta} = 0. \quad (10)$$

В. Г. Брезанцев [2] показал, что кольцевые нормальные напряжения равны радиальным нормальным напряжениям, т. е.

$$\sigma_\theta = \sigma_r. \quad (11)$$

Если пренебречь весом сжимаемого пласта и трением почвы о стенки цилиндра, то при условии $\rho = \frac{\pi}{2} = \text{const}$ (ρ — угол между направлением σ_z и осью or), составляющие напряжений определяются из уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= q \\ \sigma_r = \sigma_\theta &= q \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - c \operatorname{ctg} \varphi \left[1 - \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right]; \\ \tau_{rz} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Неравенства (8) в данном случае принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\cos \varphi} \cdot \frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2} - \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2} &> c; \\ \frac{1}{\cos \varphi} \cdot \frac{\sigma_z - \sigma_r}{2} - \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{\sigma_z - \sigma_r}{2} &> c. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Из выражений (13) следует, что вероятность разрушения тем выше, чем больше значение σ_z и чем меньше значение σ_r и σ_θ . Но так как

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \xi \sigma_z = \xi q, \quad (14)$$

то второе уравнение системы (12) можно записать как

$$\xi q = q \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - c \operatorname{ctg} \varphi \left[1 - \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right], \quad (15)$$

откуда

$$\xi = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{c}{q} \operatorname{ctg} \varphi \left[1 - \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right]. \quad (16)$$

Из полученного выражения следует, что коэффициент бокового давления зависит как от физико-механических свойств почвы, так и от нагрузки. Однако при $q = \infty$

$$\xi = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (17)$$

Таким образом, при значительных нагрузках коэффициент бокового давления можно считать для данной почвы величиной постоянной, зависящей лишь от коэффициента внутреннего трения.

На рис. 4 приведена номограмма для определения величины ξ в зависимости от значений c , φ и q . Порядок определения коэффициента ξ при помощи построенной номограммы следующий. Из точки на оси абсцисс, соответствующей заданному c , проводим вертикальную прямую до пересечения с линией семейства с пометкой, определяющей угол внутреннего трения φ данной почвы. Из точки пересечения проведем горизонтальную прямую до пересечения с линией семейства с пометкой, отвечающей заданной нагрузке q . Затем из полученной точки проводим снова вертикальную прямую до пересечения с линией семейства, имеющей соответствующую пометку φ на третьей номограмме. Из полученной точки проводим горизонтальную линию до пересечения с вертикальной ответной шкалой. Положение полученной на ответной шкале точки определяет значение искомого коэффициента ξ .

Если известно ξ , φ и q , то по построенной номограмме можно определить сцепление c , поступая в порядке, обратном изложенному.

Кроме того, на приведенной номограмме можно легко проследить характер изменения функции ξ при изменении аргументов φ , c и q . Из номограммы видно, что функция ξ убывает с увеличением аргументов c и φ и возрастает при увеличении аргумента q . Однако при этом следует заметить, что по мере приращения q степень приращения функции ξ уменьшается. Иными словами, при больших нагрузках коэффициент бокового давления мало зависит от величины нагрузки. Так, например, при $c = 4 \text{ кг/см}^2$ и $\varphi = 10^\circ$ нагрузкам в 10, 20, 30 и 50 кг/см^2 соответствуют значения q , равные 0,03; 0,37; 0,47 и 0,60. Таким образом, опытные данные, на которые ссылается механика грунтов [5], о том, что при больших значениях нагрузка практически не влияет на величину ξ , подтверждаются теоретически.

Заменив в выражениях (13) σ_1 и σ_3 через $\sigma_z \xi$, получим

$$\frac{\sigma_z}{2 \cos \varphi} (1 - \xi) - \frac{\sigma_z \operatorname{tg} \varphi}{2} (1 - \xi) \geq c$$

или

$$\sigma_z(1 - \xi) \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \geq c. \quad (18)$$

Но $\sigma_z = q$, следовательно,

$$c' = q(1 - \xi) \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} > c, \quad (19)$$

где c' — суммарные напряжения, преодолевающие силы сцепления.

Если считать ξ постоянной величиной, то увеличения разрушения можно добиться, увеличивая нагрузку q . Таким образом, степень крошения пласта при $\xi = \text{const}$ (что возможно при значительных нагрузках) может регулироваться только изменением величины прикладываемой нагрузки. Однако при увеличении нагрузки сцепление c также увеличивается. Поэтому разрушение пласта возможно лишь в том случае, если при изменении нагрузки левая часть неравенства (19) будет изменяться в большей степени, чем правая. В обратном случае будет иметь место не разрушение, а упрочнение почвенных агрегатов, или склеивание более мелких агрегатов в более крупные.

Приложенные к почвенному пласту нагрузки вызывают изменение объема данного пласта, являющееся результатом вытеснения воздушной фазы и более плотного размещения частиц почвенного скелета.

Величина изменения объема пласта зависит от сопротивляемости почвы сжатию, которая увеличивается с увеличением глубины (z) погружения деформатора (рис. 2). Деформация пласта прекращается, когда сопротивление сжатию становится равным величине приложенной нагрузки, о величине которой можно судить по деформации, вызванной этой нагрузкой. В момент прекращения деформации

$$q = p, \quad (20)$$

где p — сопротивление почвы сжатию.

Но

$$p = f(z), \quad (21)$$

следовательно,

$$q = f(z). \quad (22)$$

Пусть объем пласта до приложения нагрузки равен V_0 и после приложения нагрузки V_1 . Назовем отношение этих объемов

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_0} \quad (23)$$

коэффициентом сжатия пласта.

В случае осесимметричной задачи

$$\varepsilon = \frac{h_1}{h_0}.$$

Значит, величина линейной деформации

$$z = h_0 - h_1 = h_0(1 - \varepsilon). \quad (25)$$

В литературных источниках имеются различные зависимости для выражения функции (22). Наиболее распространенной является линейная зависимость Горячкина—Шульца—Гранд-вуане

$$q = kz, \quad (26)$$

где k — коэффициент объемного смятия.

Линейная зависимость больше других расходится с экспериментальными данными, однако является наиболее простой для решения прикладных задач.

Заменяя в данной функции z согласно выражению (25), получим

$$q = kh_0(1 - \varepsilon). \quad (27)$$

Следовательно, условие (19) можно записать как

$$c' = kh_0(1 - \varepsilon)(1 - \xi) \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \geq c. \quad (28)$$

Согласно полученному выражению условия разрушения улучшаются с увеличением толщины слоя и уменьшением коэффициента сжатия. Но если учесть, что c и ξ связаны с ε функциональной зависимостью, то приведенные выше рассуждения о влиянии величины q на условия разрушения будут справедливы и для характеристики влияния коэффициента ε на это разрушение.

При этом только следует учитывать, что ε обратнопропорционален q .

Таким образом, величина коэффициента бокового давления в зависимости от величины прилагаемой нагрузки и физико-механических свойств почвы может быть определена по выражению (16) или при помощи номограммы (рис. 4).

Пользуясь выражением (16), можно определить возможность разрушения пласта объемным сжатием в зависимости от величины прилагаемой нагрузки, коэффициентов бокового давления, внутреннего трения и сцепления почвы.

Используя выражение (28), можно определять возможность разрушения пласта объемным сжатием в зависимости от коэф-

Коэффициента объемного смятия, первоначальной толщины сжимаемого слоя и коэффициентов бокового давления, внутреннего трения и сцепления почвы.

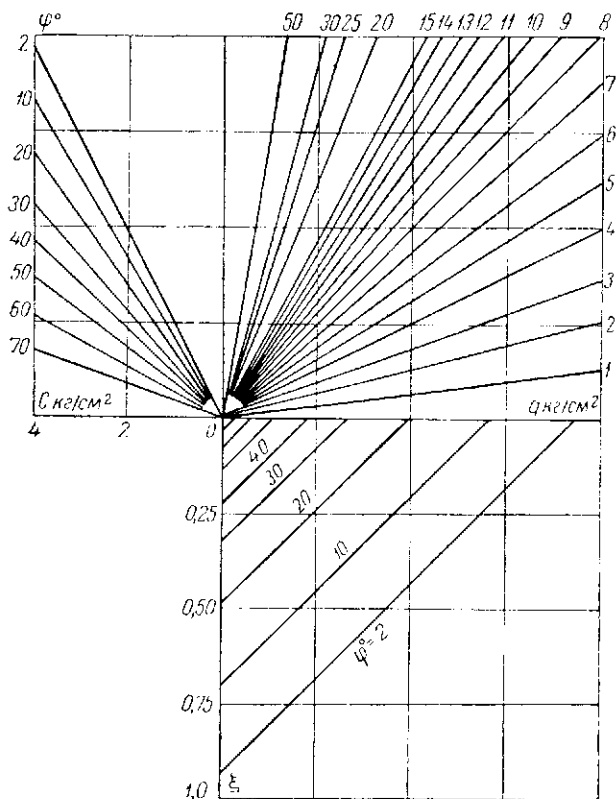


Рис. 4. Помограмма для определения коэффициента бокового давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабков В. Ф., Гербург-Гейбович А. В. Основы грунтоведения и механика грунтов, М., Изд-во «Высшая школа», 1964.
2. Березанцев В. Г. Осесимметричная задача теории предельного равновесия сыпучей среды, М., Гостехиздат, 1952.
3. Кандаулов Н. М. Прочность почвенных слоев картофельной грядки. «Тракторы и сельхозмашины», 1963, № 8.
4. Охотин В. В., Демидов В. Ф., Богданов Г. Ф. Физико-механические свойства грунтов. Л., Изд-во «Кубуч», 1935.
5. Флорин В. А. Основы механики грунтов. Т. 1, Госстройиздат, 1959.