

Yuri Chigarev<sup>1,2)</sup>, Igor Kruk<sup>2)</sup>, Aleksander Brzóstowicz<sup>1)</sup>, Waclaw Romaniuk<sup>3)</sup>, Fedor Nazarau<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Polska

<sup>2)</sup> Białoruski Państwowy Rolno-Techniczny Uniwersytet, Mińsk, Białoruś

<sup>3)</sup> Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Oddział Warszawa, Zakład Systemów Infrastruktury Technicznej Wsi, Polska

## METODY BADAŃ LABORATORYJNYCH I ANALITYCZNYCH ŚRODOWISK ROLNICZYCH O STRUKTURZE POROWATEJ

### МЕТОДИКИ ЛАБОРАТОРНЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СРЕД С ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

#### Аннотация

В работе предложен лабораторный и теоретический материал для исследования сельскохозяйственных сред, имеющих пористую структуру. В качестве примера пористой сельскохозяйственной среды выбрана почва. Описано приборное обеспечение и методики проведения опытов по определению экспресс анализа влажности, плотности, пористости, воздухопроницаемости, степени уплотнения и сдвига почвы. Приводятся новые аналитические и графические исследования по изменению пористости сферической поры в зависимости от напряжения на поверхности поры, расстояния от приложенной нагрузки и от величины нагрузки.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственные среды, почва, уплотнение, воздействие, пористость, нагрузка, напряжение, влажность, воздухопроницаемость

#### ВВЕДЕНИЕ

Изучение сельскохозяйственных сред невозможно без знания законов, с помощью которых можно прогнозировать и оптимизировать изменения, которые происходят в агросредах при антропогенном и климатическом воздействии. Сельскохозяйственные среды имеют широкий спектр, в который входят биологические и не биологические объекты, структура которых может иметь пористое строение. Современные проблемы интенсификации сельского хозяйства требуют новых подходов в создании технологий, в которых ведущая роль принадлежит средствам механизации и автоматизации. Они должны обеспечивать замену ручного труда и создавать одновременно благоприятные условия для выращивания продуктивных животных и культурных растений, сохранять устойчивую экологию агроландшафтов. Применение средств механизации может значительно влиять на структуру пористых сельскохозяйственных сред, изменяя их физические свойства. Поэтому важно иметь опытные и теоретические материалы, с помощью которых можно было бы оценивать антропогенное и климатическое влияние на сельскохозяйственные среды. В сельском хозяйстве одной из основных пористых сред является почва.

Как известно, большинство ходовых систем энергетических средств и сельскохозяйственных машин, работающих в сельскохозяйственном производстве, вызывают существенные изменения физико-механических и химических свойств почвы, что может привести к ускоренной эрозии [1, 2]. При ускоренной эрозии потери компонентов почвы не компенсируются, и она частично или даже полностью теряет свое плодородие.

Почва является не только средой обеспечения человека и животных продуктами питания, но и одной из основных сторон биосферы, влияющих на экологию [2,3]. Поэтому проектирование и прогнозирование систем сельскохозяйственных машин невозможно без учета изменения свойств почв, а, следовательно, и экологической оценки последствий результатов их взаимодействия с ней.

Известно, что почва состоит из двух подсистем: саморегулируемой и несаморегулируемой. Компонентами саморегулируемой подсистемы (фитоценоз, зооценоз и микробиоценоз) являются биологические особи, которые живут в почве и участвуют в процессах изменения ее плодородия. Компонентами несаморегулируемой подсистемы считают три фазы почвы: твердую, жидкую и газовую. Физическое состояние параметров несаморегулируемой подсистемы, например, плотность, пористость, воздухопроницаемость существенно влияют на биологическую активность саморегулируемой подсистемы. В свою очередь физическое состояние неса-

морегулируемой подсистемы зависит от внешних механических и климатических факторов под влиянием которых она может достаточно сильно изменять свои основные свойства: влажность, плотность, пористость, воздухопроницаемость и другие параметры [1]

Приведем некоторое приборное обеспечение [4] и математические формулы для определения физических свойств почвы и ее напряженного состояния необходимые в решении задач сельскохозяйственной механики. Отметим, что представленный ниже материал может быть использован для исследования других пористых сельскохозяйственных сред (например, заготовка и хранение кормов).

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

### Приборы для оценки изменения физико-механических свойств

#### Влажность (экспресс анализ)

Для определения влажности почвы применяется метод сушки инфракрасными лучами, для чего используется прибор модели С62М (рисунок 1). Он состоит из следующих составных частей: станины 1, в которой располагается реле времени 2, и электродвигателя для вращения стола (на 3 чашечки) 3. К станине 1 крепится стойка 4, предназначенная для присоединения кожуха 5. Имеется патрон, в который устанавливается термоизлучающая инфракрасная лампа 6 (308–500 Вт). Для охлаждения цоколя лампы, параболического зеркала лампы и отвода выпаренной влаги в верхней части кожуха 5 предусмотрены окна.

Прибор в сеть включается штепсельной вилкой и установкой рукоятки реле времени на заданное время. Рукояткой-указателем реле времени можно пользоваться и как выключателем, при этом ее нужно поворачивать против хода часовой стрелки. Расстояние между нижней плоскостью инфракрасной лампы и почвенными образцами регулируется подъемом или опусканием кожуха 5 путем вращения гайки 7.

Весовую влажность в лабораторных условиях определяют следующим образом.

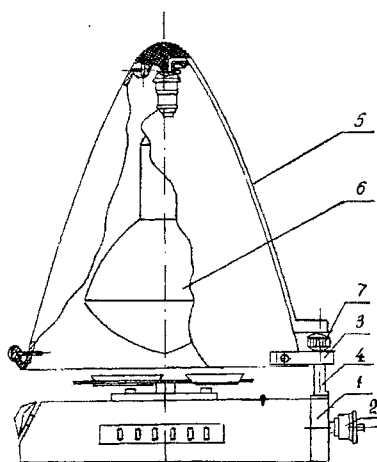


Рис. 1. Схема прибора для определения влажности почвы (экспресс метод):  
1 – станина; 2 – реле времени; 3 – стол; 4 – стойка; 5 – кожух; 6 – инфракрасная лампа; 7 – гайка

Взвешиванием определяют массу трех пустых тарелочек  $m_1$ . Затем помещают на тарелочки испытуемую почву одинаковой массы, причем на каждую тарелочку не менее 10 г. Определяют массу тарелочки с почвой  $m_2$ . После взвешивания помещают тарелочку с почвой на стол 3 прибора. Включают прибор и рукоятку-реле времени устанавливают на 3 мин., поворачивая ее по часовой стрелке. По истечении трех минут прибор выключается автоматически. Чашечки с почвой снимают с прибора и взвешивают. Операцию высушивания почвы повторяют до постоянной массы  $m_3$ . Затем определяют влажность почвы по формуле:

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Для определения влажности почвы существуют и другие методы. Наиболее распространенным является опыт, связанный с высушиванием почвы, помещенной в бюксе (стакане) в сушильном шкафу при температуре  $105^\circ$  до постоянного веса.

### Определение плотности почвы естественной структуры

Плотность почвы естественной структуры определяется по формуле

$$\rho = \frac{m_n}{V}, \quad (2)$$

где  $m_n$  – масса почвенного образца, помещенная в стакане (бюксе) или тарелочке,  
 $V$  – объем этого образца.

### Определение плотности частиц почвы

Плотность частиц почвы – это отношение массы твердых частиц  $m_{ck}$  к их объему  $V_{ck}$ .

$$\rho_s = \frac{m_{ck}}{V_{ck}}, \quad (3)$$

Определяют  $\rho_s$  пикнометрическим методом. Для определения плотности частиц незасоленных почв применяют дистиллированную воду и удаление воздуха кипячением, в случае засоленных почв – керосин и удаление воздуха вакуумированием.

В данной работе используется дистиллированная вода. Плотность частиц зависит от плотности входящего в него состав минералов. При наличии в почве таких минералов, как кварц, ортоплаз, плагиоплаз, каоменит, биотит, мусковит плотность частиц почвы колеблется в пределах 2,55–2,75 г/см<sup>3</sup>. Органические примеси снижают плотность частиц почвы.

### Определение плотности (объемной массы) сухой почвы

При исследованиях связанных с деформированием почв обычно в расчетах используют плотность сухой почвы, которую часто называют объемной массой

Объемная масса почвы – это отношение массы твердых частиц к объему

$$\rho_d = \frac{m_{ck}}{V} = \frac{\rho}{1 + 0,01W}. \quad (4)$$

### Определение пористости

Как известно, уплотнение (разуплотнение) почв сельскохозяйственными деформаторами (СД) связано с переупаковкой твердых частиц и изменением порового пространства, а, следовательно, и изменением водного и воздушного режима почвы. Пористость влияет не только на несущую способность почвы, но и на ее биологическую активность

Объем твердых частиц  $V_{ck}$  в объеме почвы  $V$  можно представить в виде

$$m = \frac{V_{ck}}{V} = \frac{\rho_d}{\rho_s}. \quad (5)$$

Пористость почвы определяют как отношение объема пор  $V_{nop}$  к общему объему образца, т.е.

$$n = \frac{V_{nop}}{V} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}. \quad (6)$$

### Определение коэффициента пористости

Коэффициент пористости определяют так

$$\varepsilon = \frac{V_{nop}}{V_{ck}}, \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{n}{m} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}. \quad (7)$$

### Пористость пустотелой сферы

Представляет интерес деформирование поры в виде пустотелой сферы. Такие поры, наполненные воздухом или водой способны к большому сопротивлению сжатия. При некоторых внешних нагрузках СД на поверхность почвы, эти поры деформируются упругим образом, т.е. полностью восстанавливают форму после прохождения СД, обеспечивая почве сохранность структуры и начальную плотность. Однако существуют поры, для которых внешнее нагруже-

ние от СД ведет к их замыканию, а, следовательно, к увеличению плотности почвы. Ниже представлена модель поры в почве в условиях нагружения от вертикальной силы.

Рассмотрим пору в виде пустотелой сферы, поверхность которой имеет толщину т.е. имеет внутреннюю и внешнюю границу (рисунок 2). Пористость такой поры до деформирования определится [5] из соотношения (7)

$$\varepsilon_0 = \frac{r_{н0}^3}{r_{н0}^3 - r_{с0}^3}, \quad (8)$$

где  $r_{с0}, r_{н0}$  – соответственно внутренний и наружный радиусы сферы до деформации

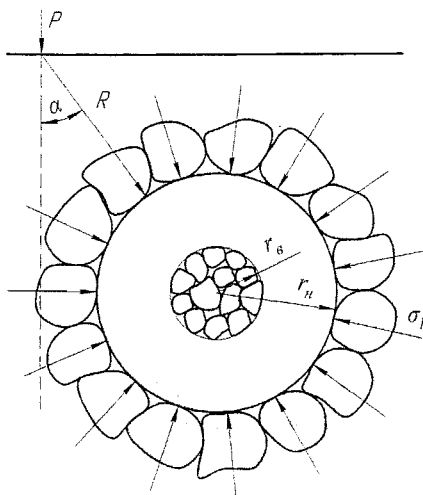


Рис. 2. Схема действия нагрузки на пору

После приложения нагрузки толщина стенки поры изменяется, а ее пористость выражается формулой

$$\varepsilon = \frac{r_n^3}{r_n^3 - r_s^3}, \quad (9)$$

где  $r_s$  – внутренний радиус стенки сферы после деформирования;

$r_n$  – наружный радиус стенки сферы после деформирования.

Нагрузку от СД будем моделировать сосредоточенной силой  $P$ . Тогда согласно формуле Буссинеска [2] на наружную поверхность стенки поры будет действовать радиальное напряжение (рисунок 2)

$$\sigma_R = \frac{3P \cos \alpha}{2\pi R^2}, \quad (10)$$

где  $\alpha$  – угол, составляемый радиусом-вектором  $R$  и вертикалью (рисунок 2).

В силу малости сферы можно считать, что на ее наружной поверхности будет действовать равномерно распределенная нагрузка (гидростатическое давление), определяемая формулой (10).

В цилиндрической системе координат связь между напряжениями и деформациями в случае упругого деформирования стенок сферы будет [5, 6]

$$\sigma_{rr} = \frac{4G}{r^3} \left( r_{с0}^3 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0 - 1} \right), \quad (11)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rr} - \frac{2G}{3r^3} \left( r_{с0}^3 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0 - 1} \right), \quad (12)$$

где  $r^3 = r_0^3 - r_0^3 \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0 - 1}$  – радиус определяющий положение точки сферы после деформации,

$r_0$  – радиус определяющий положение точки сферы до деформации,

$\sigma_{rr}$  – гидростатическое давление,

$G$  – упругий модуль сдвига.

Уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} = -\frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}). \quad (13)$$

Условия на границе стенок сферической поры будут при

$$\left. \begin{aligned} r = r_s; &\Rightarrow \sigma_{\theta\theta} = 0, \\ r = r_n; &\Rightarrow \sigma_{rr} = -\frac{3P \cos \alpha}{2\pi R^2}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Считая  $\alpha$  и  $R$  постоянными величинами из (11) – (14) получим

$$\sigma_R = \frac{4G(\varepsilon_0 - \varepsilon)}{3\varepsilon(\varepsilon_0 - 1)}. \quad (15)$$

С учетом (10) можно получить

$$P = \frac{8G\pi R^2(\varepsilon_0 - \varepsilon)}{9\varepsilon(\varepsilon_0 - 1) \cos \alpha}. \quad (16)$$

Как следует из (15) напряжение на наружную поверхность стенки рассматриваемой сферы зависит от пористости, а так же от упругих свойств скелета почвы, образующих толщину поверхности сферической оболочки. Изменение пористости в зависимости от нагружения на стенку поры и от нагрузки СД можно получить из формул (15) и (16).

Из (15) найдем:

$$\varepsilon = \frac{4G\varepsilon_0}{3\sigma_R(\varepsilon_0 - 1) + 4G}. \quad (17)$$

На рисунке 3 показано влияние модуля упругости сферической поры на изменение ее пористости.

На рисунке 4 показано влияние начальных значений пористости на текущую пористость сферической пустотелой сферы под действием нагрузки. На рисунке 5 приведен график изменения порового пространства при увеличении нагрузки на поверхности поры. Из формулы (16) имеем

$$\varepsilon = \frac{8G\pi R^2 \varepsilon_0}{9P \cos \alpha + 8G\pi R^2}. \quad (18)$$

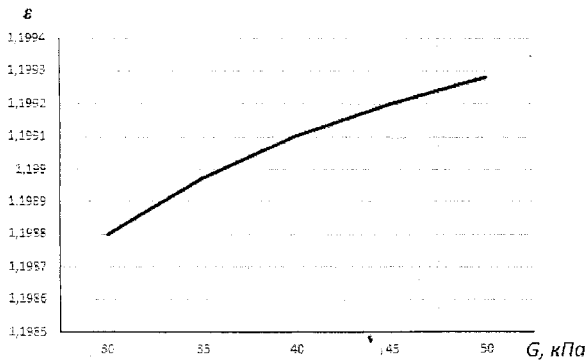


Рис. 3. Изменение пористости в зависимости от значений сдвигового модуля упругости ( $\varepsilon_0 = 1,2$ ,  $\sigma_R = 0,2$  кПа)

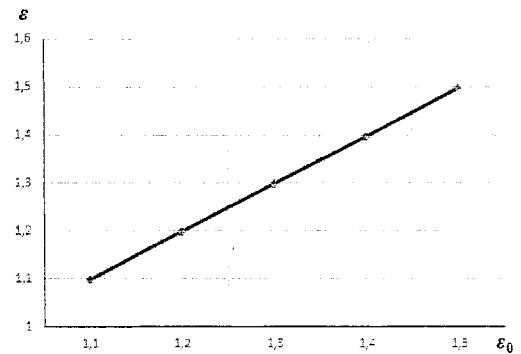


Рис. 4. Зависимости пористости  $\varepsilon$  от начальных значений  $\varepsilon_0$  ( $G = 30$  кПа,  $\sigma_R = 0,2$  кПа)

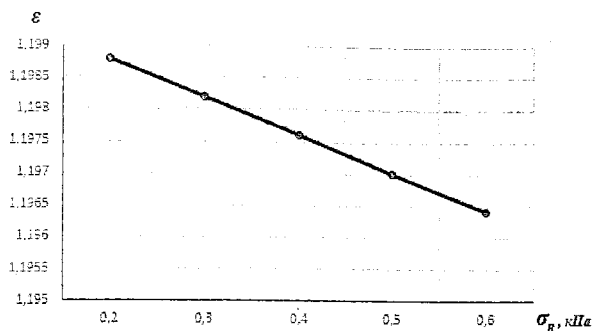


Рис. 5. Изменение пористости сферической пустотелой поры в зависимости от гидростатического напряжения  $\sigma_R$  ( $\varepsilon_0 = 1,2$ ,  $G = 30$  кПа)

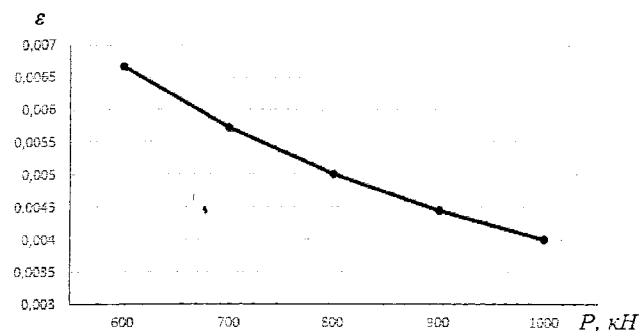


Рис. 6. Зависимости коэффициента пористости сферической пустотелой сферы  $\varepsilon$  от нагрузки СД ( $\varepsilon_0 = 1,2$ ,  $G = 30$  кПа,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $R = 0,2$  м)

На рисунках 6–8 показаны изменения коэффициента пористости в зависимости от сосредоточенной внешней силы  $P$ , угла между порой и силой  $P$ , расстояния  $R$  до поры от силы  $P$ .

Анализируя рисунок 8 можно заметить, что изменения угла  $\alpha$  на  $15^\circ$  ведет к незначительному изменению пористости сферической поры.

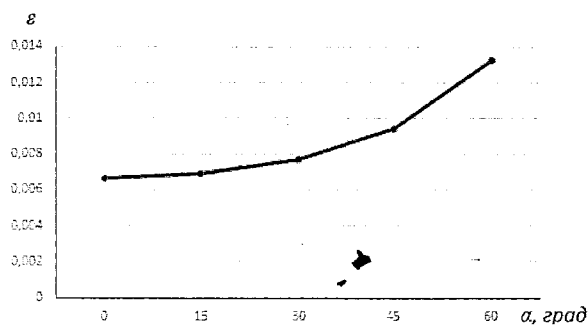


Рис. 7. Изменение пористости в зависимости от угла приложения нагрузки ( $\varepsilon_0 = 1,2$ ,  $G = 30$  кПа,  $P = 600$  кН,  $R = 0,2$  м)

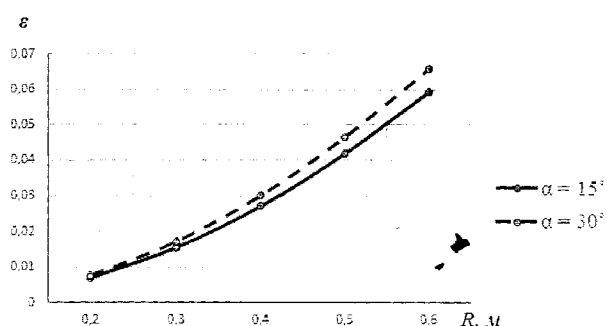


Рис. 8. Зависимость коэффициента пористости от расстояния от поверхности поры до точки приложения нагрузки  $P$  при  $\alpha = 15^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$  ( $\varepsilon_0 = 1,2$ ,  $G = 30$  кПа,  $P = 600$  кН)

### Воздухопроницаемость почвы при механическом уплотнении

Для аэробных микробиологических процессов почвы, нормального развития корневой системы растений необходим воздух, содержание которого в почве подвержено сильным колебаниям и зависит от ряда причин – типа, влажности и степени уплотнения почвы. О достаточном или недостаточном режиме воздухообмена в почве можно судить по воздухопроницаемости (скорость проникновения воздуха в почвенную толщу). В природных условиях это происходит под влиянием атмосферного давления или воды, затопляющей поверхность почвы в период снеготаяния, ливневых дождей и т.д.

В лабораторных условиях воздухопроницаемость может быть определена методом пропускания воздуха комнатной температуры через стандартный цилиндрический почвенный образец с многократным предварительным уплотнением. Примером забора почвы может служить ящик почвенного канала, разработанного в Западно-поморском технологическом университете в Щецине (Республика Польша), в котором почва предварительно уплотняется жестким штампом разными силами (рисунок 9) [7]. С целью наблюдения за процессом деформирования почвы под действием штампа передняя стенка ящика сделана прозрачной и объем почвы с помощью мелового порошка разделен на одинаковые по высоте слои (рисунок 10).

Предложенная конструкция почвенного канала приблизительно соответствует схеме нагружения полупространства СД (рисунок 11) [8] и математической модели (10).

Воздухопроницаемость  $ВП$  ( $\text{м}^4/\text{Н}\cdot\text{с}$ ), определяется по формуле

$$ВП = \frac{Vh}{F_{pt}}, \quad (19)$$

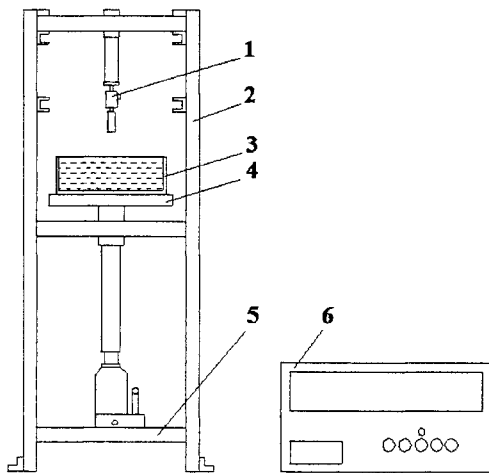


Рис. 9. Схема лабораторного почвенного канала:  
1 – датчик силы; 2 – рама; 3 – специальный ящик с почвой; 4 – стол; 5 – гидравлический пресс;  
6 – компьютер

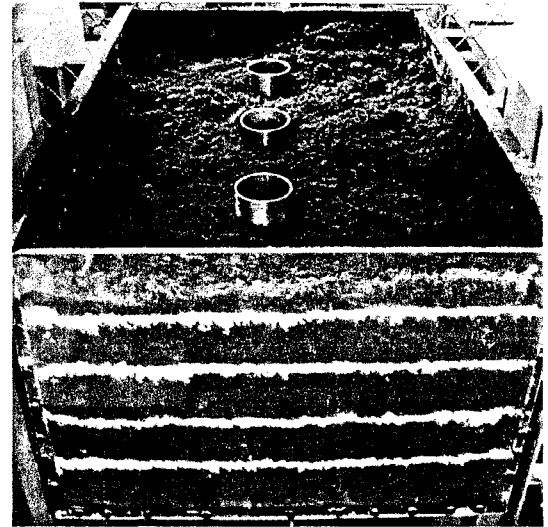


Рис. 10. Специальный ящик для забора почвенных образцов при исследовании воздухопроницаемости почвы

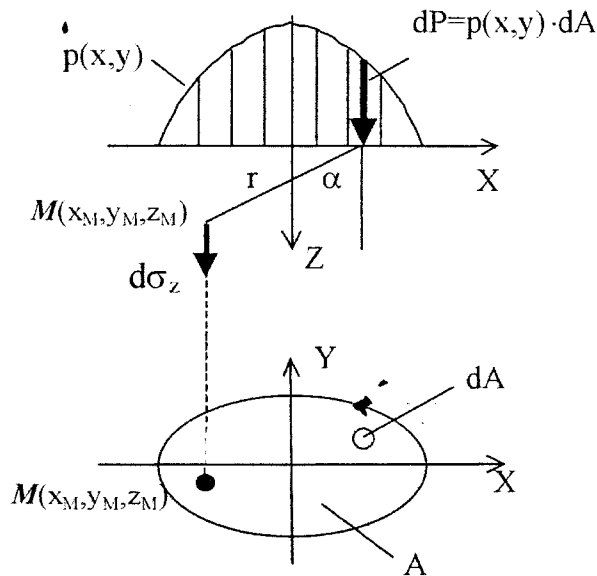


Рис. 11. Схема нагружения полупространства

где  $V$  – объем воздуха, прошедшего через образец,  $\text{м}^3$ ;  
 $h$  – высота образца,  $\text{м}$ ;  
 $F$  – площадь поперечного сечения образца,  $\text{м}^2$ ;  
 $p$  – давление воздуха перед образцом,  $\text{Н/м}^2$ ;  
 $t$  – время прохождения воздуха через образец,  $\text{с}$ .

Воздухопроницаемость в лабораторных условиях удобно определять на приборе модели О42 М (рисунок 12). Данный прибор состоит из следующих составных частей: станины 13, бака 5 с трубкой 6, внутри бака находится колокол с трубкой 4. При опускании колокола в бак трубка 4 входит в трубку 6. До начала испытания в бак 5 наливают воду и в нее опускают колокол 3. Воздух из-под колокола под действием груза 2 выходит через трубку 6 и трехходовой кран 10, позволяющий: удерживать воздух под колоколом (положение 1); выпускать воздух из-под колокола (положение 2); выпускать воздух из-под колокола через почвенный образец (положение 3). В чашечки 9 устанавливают ниппели 8 с отверстиями диаметром 0,5 или 1,5 мм. Первый ниппель используют при испытании почв с высокой воздухопроницаемостью (до 50), а второй при испытании почв с низкой воздухопроницаемостью. Для установки гильзы с образцом имеется место в чаше 9, которая через отверстие 11 соединяется с манометром 12.

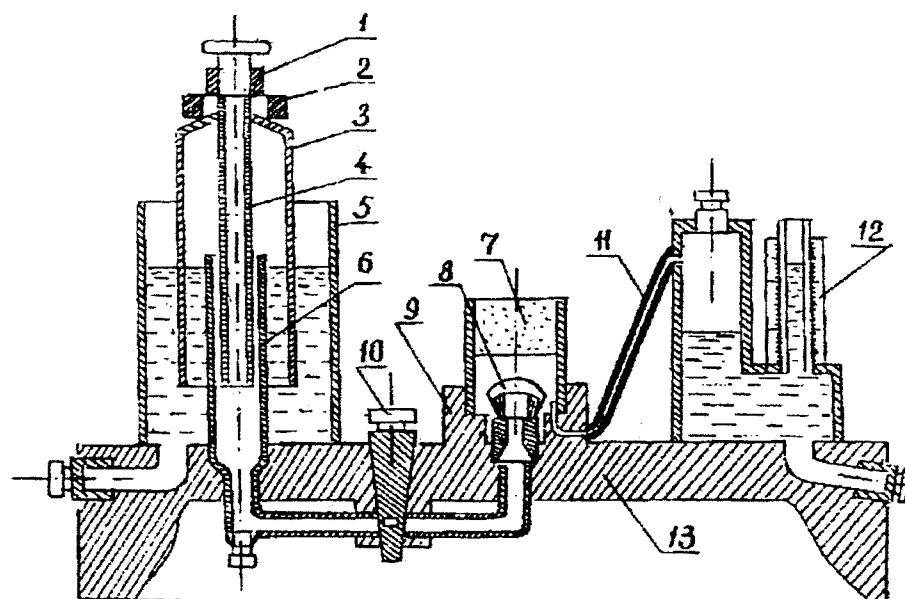


Рис. 12. Схема прибора для определения воздухопроницаемости почвы

### Определение показателей уплотнения почвы

Характеристики почв, необходимые для расчета деформаций пахотного (подпахотного) слоя, определяют лабораторными и полевыми методами. В лабораториях для этой цели используют компрессионные приборы (рисунок 13). Сжимаемость почвы зависит от ее состава, пористости, влажности, структуры и т.д.

В результате испытания почв на компрессионных приборах определяют коэффициент уплотнения  $\alpha$  и модуль деформации  $E_n$ , которые используют в расчетах агротехнической проходимости и для общей качественной оценки свойств почвы.

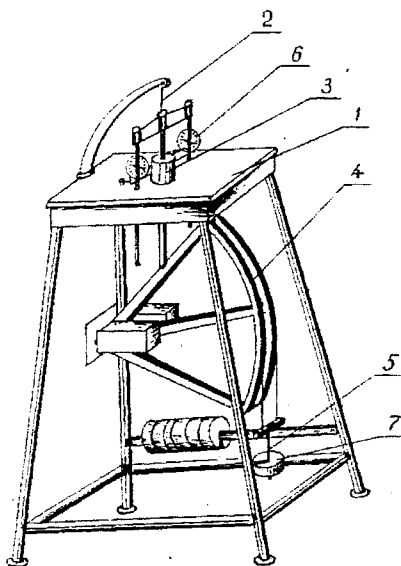


Рис. 13. Схема компрессионного прибора: 1 – металлический стол; 2 – поршень; 3 – почвоотборное кольцо; 4 – рычаг; 5 – подвеска; 6 – индикатор; 7 – гиря

### Подготовка прибора:

1. Кольцо с почвой 3 накрывают с двух сторон фильтрованной бумагой и устанавливают на перфорированный металлический диск режущей частью вверх (рисунок 13).
2. Закрепляют почвоотборочное кольцо 3 направляющим кольцом и на почву ставят поршень (штамп) 2.
3. Всю систему одометра помещают на металлический стол компрессионного прибора 1.



4. Для замера деформаций образца почвы устанавливают два индикатора 6. Стрелки индикаторов ставят в положение 0,00.

### Проведение испытаний

Испытания проводят путем нагружения образца почвы нагрузкой, которая передается посредством рычага 4 на поршень прибора 2. Для этого на держатель-подвеску 5 для гирь 7 устанавливают грузы. Сжимающее давление  $p$  (МПа), на образец почвы определяется по формуле

$$p = \frac{Mn' + m'}{10F}, \quad (20)$$

где  $M$  – масса груза, кг;

$F$  – площадь образца, см<sup>2</sup>;

$m'$  – масса тяговой рамы прибора в кг (2,3 кг);

$n'$  – кратность увеличения нагрузки рычагом ( $n' = 10$ );

10 – переводной коэффициент.

Если задается давление  $p$  на почву, то из вышеприведенной формулы легко определяется масса груза

$$M = \frac{10pF - m'}{n'}. \quad (21)$$

Так для получения в приборе давления  $p = 0,05$  МПа на подвеску рычага нужно установить следующий груз

$$M = \frac{10 \cdot 0,05F - 2,3}{10}. \quad (22)$$

Вычисляют коэффициент сжимаемости (уплотнения) почвы. Коэффициент сжимаемости почвы  $a$  (МПа<sup>-1</sup>) равен отношению приращения коэффициента пористости почвы к приращению давления

$$a = \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_k}{p_k - p_n}, \quad (23)$$

где  $p_n$  и  $p_k$  – начальное и конечное давление на почву;

$\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_k$  – начальный и конечный коэффициент пористости (определяют из графика компрессионной кривой по  $p_n$  и  $p_k$ ).

По величине коэффициента сжимаемости почвы разделяют на:

а) сильно сжимаемые, если  $a > 0,5$  МПа<sup>-1</sup> (снова  $a = 0,05$  см<sup>2</sup>/кгс) – такие почвы требуют предварительного уплотнения и закрепления;

б) средне сжимаемые, если  $0,5 > a > 0,05$  МПа<sup>-1</sup>;

в) мало сжимаемые, если  $a < 0,05$  МПа<sup>-1</sup> ( $a < 0,05$  см<sup>2</sup>/кгс).

4. Модуль деформации  $E_n$  (МПа) вычисляют по формуле

$$E_n = \frac{1 + \varepsilon_n}{a} \beta, \quad (24)$$

где  $\varepsilon_n$  – начальный коэффициент пористости почвы;

$\beta$  – коэффициент, зависящий от коэффициента бокового расширения  $\mu$  и учитывающий отсутствие поперечного расширения почвы в компрессионном приборе;

ГОСТ 23908-79 рекомендует принимать  $\beta$ : для пылеватых и мелких песков – 0,8; супесей – 0,7; суглинков – 0,5; глин – 0,4.

Модуль деформации, в отличие модуля упругости, учитывает не только упругие, но и остаточные деформации почвы.

Формулу (24) можно с учетом (23) записать

$$E_n = \frac{(1 + \varepsilon_n)(p_k - p_n)}{\varepsilon_n - \varepsilon_k} \beta. \quad (25)$$

### Испытание почв на сдвиг.

Существует несколько приборов на сдвиг почвы, наиболее известные из них прибор Литвинова и прибор новой модификации ПСГ-3М РЭ.

Под сдвигом почвы понимают смещение одной части ее по отношению к другой в результате бокового (тангенциального) давления.

Сопротивления сдвигающим (касательным) усилиям складывается из сцепления, обусловленного молекулярными и капиллярными и сил внутреннего трения. Напряжение сдвигающихся усилий, превышающих сопротивление сдвигу, вызывает разрыв (срез) в почве и скольжение по плоскости среза, которому противодействует трение.

Силы сцепления не зависят от нормальной нагрузки, тогда как трение в известной мере пропорционально ей.

Тангенциальное усилие  $\tau$  при перемещении одного пласта почвы по отношению к другому, нормальное давление  $\sigma$  и сцепление частиц связаны уравнением

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (26)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi$  – угловой коэффициент (коэффициент внутреннего трения).

Пористость в случае касательного напряжения можно определить с учетом (17)

$$\varepsilon = \frac{4G\varepsilon_0 \operatorname{tg} \varphi}{3(\varepsilon_0 - 1)(\tau - c) + 4G \operatorname{tg} \varphi}. \quad (27)$$

Нормальное напряжение  $\sigma$  можно определить на лабораторной установке, представленной на рисунке 9, или на сдвиговых приборах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается инструментальный материал (лабораторный и теоретический) для исследования сельскохозяйственных сред, имеющих пористую структуру, в частности почвы. Описано приборное обеспечение и методики проведения опытов по определению экспресс анализа влажности, плотности, пористости, воздухопроницаемости, степени уплотнения и сдвига. Приводятся новые аналитические и графические исследования по изменению пористости поры в виде пустотелой сферы почвы в зависимости от напряжения на внешней поверхности поры, расстояния между порой и приложенной нагрузкой и от величины нагрузки.

В случае присутствия сдвиговых деформаций изменение порового пространства зависит от касательного напряжения, коэффициента внутреннего трения, коэффициента сцепления, упругих свойств поры.

### ЛИТЕРАТУРА

1. РУСАНОВ В.А. 1998. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути решения. М., ВИМ, – 367 с.
2. ЧИГАРЕВ Ю.В., СИНКЕВИЧ П.Н. 2004. Математические основы механики почв. Мн., УП Технопринт, – 163 с.
3. ЧЫГАРОЎ Ю.У. 1991. Ацэнка агра-тэхнічнага пашкоджання глебы пры тэхнічным дефармаванні / Ю.У.Чыгароў // Весці АН БССР. – № 3. – С. 51 – 55.
4. ВАДЮНИНА А.Ф., КОРЧАГИНА З.А. 1986. Методы исследования физических свойств почв. М., Агропромиздат, – 416 с.
5. КОЛИКОВ А.П., ПОЛУХИН П.И. и др. 1986. Новые процессы деформации металлов и сплавов. М., Высш.шк., – 351 с.
6. АМЕНАДЗЕ Ю.А. Теория упругости. М. 1976. Высшая школа, – 272 с.
7. ЧИГАРЕВ Ю.В., КРУК И.С., СНЕГ М., НОВИКОВ А.А. 2012. Влияние состояния проректора колес энергетических средств на уплотнения почв. Агропанорама. № 4, – с. 7 – 11.
8. ЧИГАРЕВ Ю.В., ДАВИДОВСКИЙ Б., НОВОВЕЙСКИЙ Р. 2009. Механобиологические модели почв. Международная конференция. «Опыт. Проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК». Минск, Ч.2., – с. 180 – 186.

## **METODY BADAŃ LABORATORYJNYCH I ANALITYCZNYCH ŚRODOWISK ROLNICZYCH O STRUKTURZE POROWATEJ**

Yuri Chigarev, Igor Kruk, Aleksander Brzóstowicz, Waław Romaniuk, Fedor Nazarau

### **Streszczenie**

W artykule zaproponowano laboratoryjne i teoretyczne dane do badania gleb rolniczych o porowatej strukturze. Opisano oprzyrządowanie i metody prowadzenia badań w celu określenia szybkiej analizy wilgoci, gęstości, porowatości, przepuszczalności powietrza, stopnia ubicia i ścinania gleby.

**Słowa kluczowe:** środowisko rolnicze, zagęszczenie gleby, porowatość, obciążenie, napięcie, wilgotność, przepuszczalność powietrza

## **METHODS OF LABORATORY AND ANALYTICAL STUDIES OF AGRICULTURAL ENVIRONMENTS WITH A POROUS STRUCTURE**

Yuri Chigarev, Igor Kruk, Aleksander Brzóstowicz, Waław Romaniuk, Fedor Nazarau

### **Abstract**

In the proposed laboratory and the theoretical material for the study of agricultural environments having a porous structure. As an example, porous agricultural environment the selected soil. Describes the instrumentation and methodology for conducting experiments to determine the Express analysis of moisture content, density, porosity, air permeability, degree of compaction and shearing of soil. We present new analytical and graphical study on the change of porosity of spherical pores depending on the voltage on the surface of the pores, the distance from the applied load and from the load.

**Key words:** agricultural environment, soil, compaction, exposure, porosity, stress, strain, moisture, breathability