

**ФБОУ ВО «БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Я.П. Лобачевский

С.И. Старовойтов

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ

Монография

БРЯНСК -2015

УДК 631.412 (035.3)

ББК 40.3

Л 68

ISBN 978-5-88517-221-9

Лобачевский, Я.П. Физические аспекты суглинистой почвы: Монография / Я.П. Лобачевский, С.И. Старовойтов - Брянск, Издательство Брянского ГАУ, 2015. – 92 с.

В монографии приводятся результаты исследований влияния значений абсолютной влажности суглинистой почвы на модуль упругости первого рода, коэффициент динамической вязкости, углы внешнего и внутреннего трения, предел прочности почвы на растяжение и сжатие, величину упругой составляющей деформации графика сжатия, высоту падения, соответствующую высоте разрушения, коэффициент рыхления. Уточнен коэффициент Пуассона.

Монография может быть полезна для специалистов АПК, преподавателей, сотрудников, студентов, магистров и аспирантов.

Рецензенты: заведующий кафедрой «Оборудование лесного комплекса», декан механико-технологического факультета ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», д.т.н., доцент А.Н. Заикин, профессор кафедры агрохимии, почвоведения и экологии Брянской ГСХА, к.с.-х.н. В.В. Осмоловский.

ISBN 978-5-88517-221-9

© Брянский ГАУ, 2015

© Лобачевский Я.П., 2015

© Старовойтов С.И., 2015

Содержание

	стр.
1. Введение.....	4
2. Обзор физических параметров суглинистой почвы.....	7
2.1 Реологические модели почвы.....	7
2.2 Влажность почвы.....	11
2.3 Твердость почвы.....	15
2.4 Внешнее трение.....	17
2.5 Внутреннее трение.....	24
2.6 Вязкость почвы.....	27
2.7 Предел прочности почвы на растяжение.....	30
2.8 Предел прочности почвы на сжатие. Упругая составляющая относительной деформации.....	32
2.9 Модуль упругости первого рода.....	34
2.10 Коэффициент Пуассона.....	37
2.11 Тела скольжения.....	40
2.12 О крошение пласта.....	44
3. Программа и методика экспериментальных исследований.....	48
3.1 Программа исследований.....	48
3.2 Методика проведения экспериментальных исследований.....	51
3.2.1 Методика определения влажности и твердости почвы.....	51
3.2.2 Методика определения угла внешнего трения почвы.....	53
3.2.3 Методика определения угла внутреннего трения почвы.....	56
3.2.4 Методика определения предела прочности почвы на растяжение.....	57
3.2.5 Методика определения предела прочности и упругой составляющей относительной деформации почвы при сжатии.....	59

3.2.6	Методика определения модуля упругости первого рода	60
3.2.7	Методика определения коэффициента динамической вязкости почвы.....	63
3.2.8	Методика определения коэффициента Пуассона.....	64
3.2.9	Методика определения критической высоты разрушения почвенных частиц.....	68
3.2.10	Методика определения коэффициента рыхления.....	70
4	Результаты экспериментальных исследований.....	71
4.1	Результаты исследования твердости и влажности суглинистой почвы в условиях засушливого лета 2010 года...	71
4.2	Угол внешнего трения почвы.....	74
4.3	Угол внутреннего трения почвы.....	75
4.4	Предел прочности почвы на растяжение.....	76
4.5	Предел прочности почвы на сжатие. Упругая составляющая относительной деформации сжатия.....	77
4.6	Модуль упругости первого рода.....	78
4.7	Коэффициент динамической вязкости почвы.....	78
4.8	Коэффициент Пуассона.....	80
4.9	Критическая высота разрушения почвенных частиц.....	80
4.10	Коэффициент рыхления.....	82
5	Заключение.....	84
	Список литературы.....	85

1. Введение

Обработка почвы, в частности, основная обработка почвы, считается одной из наиболее энергоемких технологических операций в производстве с/х культур. Плужный корпус плуга, который и обеспечивает основную обработку почвы, включает в себя лемех, отвал, полевую доску, стойку. По результатам исследований ряда ученых наиболее энергоемким элементом плужного корпуса является лемех. Снижение энергоемкости лемеха является задачей важной и актуальной.

Существуют различные способы или попытки снижения его энергоемкости. К ним относятся колебания лемеха или же в целом плужного корпуса, изменение угла наклона его поверхности ко дну или лезвия к стенке борозды, изменение его геометрии. Уменьшение энергоемкости за счет осуществления колебаний или изменения положения лемеха ко дну или стенке борозды конструктивно осуществимо, но сопряжено с повышением себестоимости сельскохозяйственного орудия и со снижением надежности конструкции в работе.

Наиболее целесообразным способом снижения энергоемкости лемеха является изменение его геометрии. Изменить можно или геометрию поверхности, или же геометрию режущей кромки. Целесообразность изменения поверхности лемеха или режущей кромки должна быть увязана с режимами работы самого лемеха. В частности, при работе на суглинистых почвах, лемех плужного корпуса может работать или же в режиме скалывания, или же в режиме излома пласта.

Работа в режиме скалывания сопровождается доминирующей ролью касательных напряжений. Работа же в режиме излома сопровождается главенствующей ролью нормальных напряжений. А возможна работа лемеха и в режиме скалывания, и в режиме излома пласта. Оценить режимы работы лемеха возможно лишь в случае использования величин допускаемых нормальных и касательных напряжений для почвы определенного гранулометрического состава. Последние два параметра могут быть получены благодаря величине накопленной удельной потенциальной энергии, при которой возможно начало разрушения почвенных фрагментов. Удельная потенциальная энергия разрушения напрямую зависит от критической высоты разрушения почвенных частиц.

Данные величины также необходимы для определения тягового усилия поверхности лемеха, которая обладает постоянным углом резания в ортогональном к лезвию сечению и работает в условиях косоугольного изгиба при динамическом нагружении почвенного пласта.

Удельная потенциальная энергия разрушения в зависимости от значения абсолютной влажности позволяет спрогнозировать и возможный коэффициент рыхления суглинистой почвы.

Работая в режиме излома пласта при определяющей роли нормальных напряжений, по ходу движения лезвия лемеха формируется вовлекаемый в деформацию за счет волн напряжения объем почвенного массива. С учетом этого тяговое усилие режущей кромки должно оцениваться модулем упругости первого рода, коэффициентом динамической вязкости, углами внешнего и внутреннего трения почвы.

Величина твердости суглинистой почвы в зависимости от значений абсолютной влажности суглинистой почвы в сочетании с модулем упругости первого рода, углами внешнего трения позволяет для оценки тягового сопротивления плужных корпусов использовать в качестве экспертных уравнений выражения В.В. Кацыгина, Н.В. Щучкина, Г.Н. Синеокова, Г.П. Горячкина.

Как вариант снижения энергоемкости режущей кромки лемеха, которая может работать в режиме излома пласта, является ее отбортовка в сторону лицевой поверхности. Угол отбортовки должен быть увязан с упругой составляющей величины относительной деформации графика сжатия. При этом работа лезвия лемеха будет проходить в пределах упругих деформаций, что минимизирует возможное разрушение почвенных частиц и залипание поверхности режущей кромки.

Энергоемкость режущей кромки с учетом угла отбортовки лезвия лемеха также может оцениваться кроме модуля упругости первого рода, коэффициента динамической вязкости, углов внешнего и внутреннего трения, пределом прочности почвы на растяжение, коэффициентом Пуассона.

Таким образом, к основным физическим параметрам суглинистой почвы можно отнести модуль упругости первого рода, коэффициент динамической вязкости, углы внешнего и внутреннего трения, предел прочности на растяжение и сжатие, коэффициент Пуассона, твердость почвы, упругую составляющую величины относительной деформации графика сжатия суглинистой почвы, критическую высоту разрушения почвенных частиц, косвенно связанную с удельной потенциальной энергией разрушения почвенных фрагментов.

Имеется множество экспериментальных данных, часто противоречивых, по представленным основным физическим параметрам суглинистой почвы. Тем не менее, эти данные требуют проверки и уточнения в виду широкого спектра их использования.

2. Обзор физических параметров суглинистой почвы

2.1 Реологические модели почвы

Важно установить понятие о почве как о среде, которая воспринимает и передает механическое воздействие деформаторов [40]. Многообразие типов почв можно свести к двум основным моделям: дискретной среды и сплошной. Свойства макроскопических сред, состоящих из отдельных частиц, изучает статическая механика, опираясь на законы теории вероятностей и математической статистики. Однако эти работы, начатые Г.И. Покровским, не получили дальнейшего развития.

В каждой сплошной конкретной почве наблюдается специфическая зависимость напряжений и деформаций [28, 5], которую можно выразить следующей формулой

$$\begin{bmatrix} \sigma_x(t) & \tau_{yx}(t) & \tau_{zx}(t) \\ \tau_{xy}(t) & \sigma_y(t) & \tau_{zy}(t) \\ \tau_{xz}(t) & \tau_{yz}(t) & \sigma_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x(t) & \varepsilon_{yx}(t) & \varepsilon_{zx}(t) \\ \varepsilon_{xy}(t) & \varepsilon_y(t) & \varepsilon_{zy}(t) \\ \varepsilon_{xz}(t) & \varepsilon_{yz}(t) & \varepsilon_z(t) \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Функция f представляет собой идеальную модель взаимосвязи напряжений и деформаций. Существуют различные идеальные модели, которые по степени комбинации упругих и вязких свойств, можно разбить на три класса.

К первому классу можно отнести модель Гука и Ньютона (рис. 2.1) [28]. К идеальным моделям второго класса можно отнести модели Максвелла и Фойгта [11, 26] (рис. 2.1). К идеальным моделям третьего класса можно отнести модели Пойнтинга -Томсона, Барджерса (рис. 2.2).

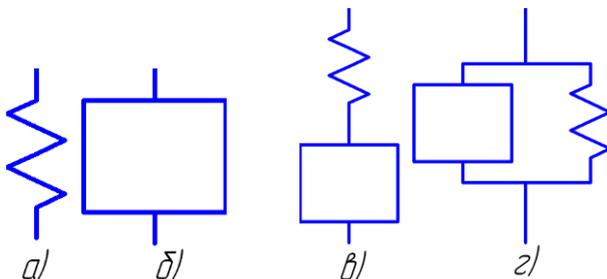


Рис. 2.1. Реологические модели 1 и 2 класса:
а-модель Гука; б-модель Ньютона; в-модель Максвелла; г-модель Фойгта

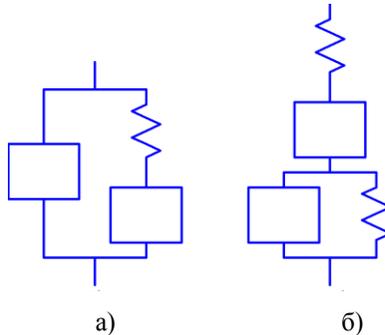


Рис. 2.2. Реологические модели 3 класса:
 а – Пойнтинга -Томсона, б - Барджерса

Выбор идеальной модели, в свою очередь, можно осуществить тремя способами: на основе анализа влажности почвы, на основе анализа влажности почвы и характера приложения нагрузки, на основе анализа влажности почвы и кривой водоудержания [51].

Так, модель Максвелла представляет собой почву, перенасыщенную влагой. Поведение трёхфазного тела, в котором поры между структурными агрегатами заполнены водой и воздухом, описывается моделью Фойгта [26]. По сути дела, выбор или модели Фойгта, или Максвелла осуществляется лишь по степени содержания влаги в почве.

В тоже время характер приложения нагрузки вносит коррективы в идеальную модель почвы. Так, при деформации переувлажнённой почвы происходит вытеснение воды из пор. Скорость деформации определяется скоростью движения воды в порах почвы, которая в различной мере зависит от коэффициента фильтрации. В свою очередь коэффициент фильтрации зависит от механических свойств почвы. С увеличением содержания в почве глинистых частиц коэффициент фильтрации резко уменьшается. То есть, практически, эти почвы водонепроницаемы. При быстром приложении нагрузки данные почвы деформируются как малосжимаемое тело [15].

При выборе модели первого класса можно руководствоваться графиками, полученными в результате экспериментальных исследований (рис. 2.3). Если при увеличении нагрузки имеется прямопропорциональная зависимость между нормальным напряжением σ и продольной относительной деформацией ε , то почву можно отнести к модели Гука (рис.2.3, (а)), то есть представить её в виде упругой среды.

Если же деформация возрастает неограниченно при определённой величине σ , то почву можно представить моделью Ньютона.

На рисунке 2.3 (б) представлен график, отражающий зависимость напряжения и деформации от времени. Если деформация при постоянной нагрузке отображается прямой 1, то данный тип почвы можно отнести к модели Фойгта, кривой 2 - к модели Максвелла [24]. Построить данные зависимости можно с помощью прибора Цитовича-Файнциммера [36].

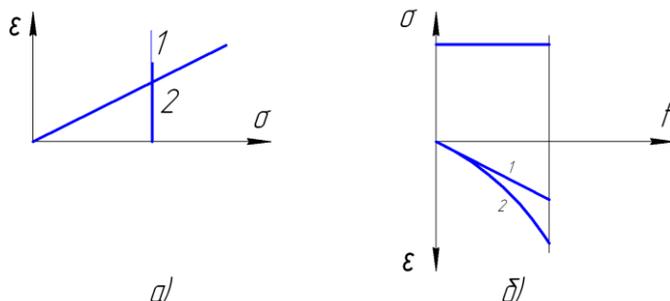


Рис. 2.3. К выбору модели первого и второго класса

Критерием выбора модели третьего класса является кривая водоудержания [6, с.196], зависящая от мехсостава почвы и ее влажности. Кривая водоудержания и прямые перехода почвенной влаги строятся в координатах $\Psi\theta\omega$ (рис. 2.4). По оси абсцисс отложены значения абсолютной влажности г/г, а по оси ординат - значения капиллярно-сорбционного потенциала почвенной влаги Ψ , представленные в см водяного столба. Прямые перехода почвенной влаги строятся с использованием уравнений, полученных Ворониным А.М. [4, с. 196]. Прямые перехода отражают возможность перехода капиллярной почвенной влаги в капиллярно-гравитационную, плёночно-капиллярную в капиллярную, плёночно-стыковую в плёночно-капиллярную, прочно связанную в плёночно-стыковую.

После построения прямых перехода почвенной влаги строится кривая водоудержания. Кривая водоудержания характеризует зависимость между капиллярно-сорбционным потенциалом почвенной влаги и значениями абсолютной влажности почвы. Кривые данного вида, в частности кривая удержания ненарушенного горизонта дерново-подзолистой почвы, строятся из отдельных участков. Каждый участок соответствует определённой влажности почвы. При наличии определённого значения абсолютной влажности почвы строится вертикаль-

ный отрезок до пересечения с кривой водоудержания. От полученной точки пересечения проводится прямая, параллельная одной из прямых перехода почвенной влаги. Данная прямая и указывает на модель третьего класса, идеализирующую физические свойства почвы.

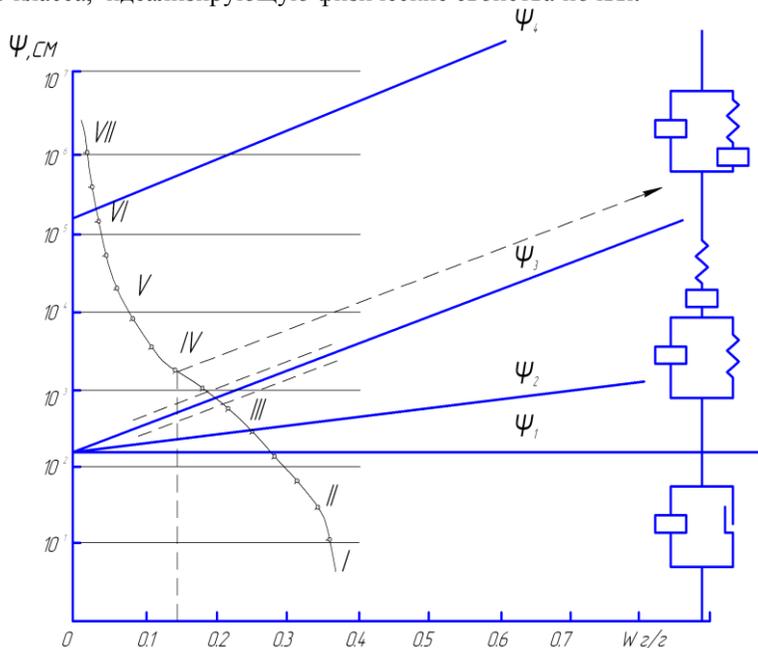


Рис. 2.4. Прямые перехода и кривая водоудержания

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. При значительном допущении в расчётах можно воспользоваться идеальной моделью хрупкой или вязкой почвы;
2. В уточняющих расчётах можно воспользоваться моделью Фойгта или Максвелла;
3. Выбор идеальных моделей первого и второго класса осуществляется на основании анализа зависимости $\sigma = f(\epsilon)$;
4. При значительной точности выполняемых расчётов выбор модели Пойнтинга -Томсона, Барджерса, Бингма - Шведова осуществляется на основе анализа абсолютной влажности почвы, прямых перехода почвенной влаги и кривой водоудержания.

2.2 Влажность почвы

Вода, заполняющая поры почвы, состоит из раствора различных солей. Она может находиться в твердом (в виде льда в мерзлой почве), жидком и парообразном состоянии. По характеру взаимодействия со скелетом грунта вода подразделяется на свободную и связанную. Свободная поровая вода по физическим свойствам не отличается от обычной и подчиняется основным законам гидростатики. Связанная поровая вода в результате физико-химического взаимодействия молекул воды с поверхностью глинистых частиц отличается по некоторым физическим свойствам от свободной воды.

Различают два вида свободной воды: гравитационную воду [2] и капиллярную. Вода, передвигающаяся под действием силы тяжести, называется гравитационной. В порах крупнообломочных грунтов и крупнозернистых песков всю поровую воду обычно считают гравитационной.

Капиллярная вода движется против силы тяжести. Поднятие воды по капиллярным порам почвы является результатом действия подъемной силы вогнутых менисков. Подъемная сила мениска определяется по формуле Лапласа

$$Q = \frac{2 \times \alpha}{R}, \quad (2.2)$$

где α – поверхностное натяжение жидкости;

R – радиус кривизны мениска.

Большие различия в высоте капиллярного поднятия воды и скорости ее передвижения в разных почвах зависят от влияния коллоидно-химических свойств, от наличия в почве обменного натрия и кальция, гумусовых частиц и водорастворимых солей.

Капиллярную воду подразделяют на три вида: воду углов пор, капиллярно - подвешенную, собственно капиллярную. Собственно капиллярная вода передвигается вверх или в сторону от уровня грунтовых вод. При просыхании почвы ее запас всегда пополняется за счет подсоса воды с нижележащего горизонта грунтовых вод. Капиллярно - подвешенная вода чаще всего встречается в песках и образуется при промачивании толщи грунта сверху. Капиллярно - подвешенная вода не имеет непосредственной связи с уровнем грунтовых вод и поэтому не может ими питаться. Вода углов пор (защемленная стоковая вода) находится в суженных участках, обычно изолированных друг от друга. И занимает незначительное пространство по отношению ко всему объему.

Взаимодействие воды с почвой, передвижение почвенной влаги и ее усвоение растениями в почвах, различных по механическому составу, структуре, порозности, происходит неодинаково [76]. Существуют определенные значения влажности почвы, при достижении которых резко меняются как свойства почвенной влаги, так и ее доступность для растений. Эти определенные значения чаще всего называют узловыми точками. Эти узловые точки, характеризующие водно-физические свойства почвы, называются агрогидрологическими характеристиками почвенной влаги. К агрогидрологическим характеристикам почвенной влаги относят следующие понятия: непродуктивная влага, полная влагоемкость, влажность устойчивого завядания, влажность разрыва капилляров, наименьшая полевая влагоемкость, капиллярная влагоемкость.

Для сельскохозяйственного производства основное значение имеет только та часть почвенной влаги, которая обеспечивает формирование урожая культурных растений, то есть превышает влажность устойчивого завядания. Поскольку лишь эта влага используется для формирования продуктивности сельскохозяйственных растений, ее называют продуктивной влагой.

Непродуктивная влага - часть почвенной влаги, которая не усваивается растениями. Эта часть почвенной влаги удерживается силами, величина которых превышает осмотическое давление клеточного сока корневых волосков растений. В почве содержится при этом только прочносвязанная с частицами почвы вода.

Влажность устойчивого завядания - предел увлажнения почвы, при котором появляются необратимые признаки увядания растений (табл.2.1).

Таблица 2.1

Влажность устойчивого завядания

Типы почв	Влажность устойчивого завядания
Песок	0,5...1,5
Супесь	1,5...4,0
Суглинок легкий	3,5...7,0
Суглинок средний	5,0...8,0
Суглинок тяжелый	8,0...12,0
Глина	12,0...20,0
Торф низинного болота	40,0...50,0

Наименьшая полевая влагоемкость представляет собой максимальное количество влаги, которое может находиться в почве в условиях свободного дренирования, то есть после стекания избытка влаги. С увеличением влажности почвы от влажности устойчивого завядания до наименьшей влагоемкости увеличивается доступность влаги для почвы. При влажности, близкой к величине наименьшей влагоемкости, в почве создается хорошая обеспеченность растений водой. Почва при этом находится в мягкопластичном состоянии, что позволяет иметь наивысшую производительность при ее обработке.

Наименьшая влагоемкость в зависимости от механического состава почвы изменяется в довольно широких пределах (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Наименьшая влагоемкость (мм продуктивной влаги)

Почвы	Слой почвы (см)	
	0-20	0-100
Суглинистые	40-50	170-190
Супесчаные	30-40	150-170
Песчаные	20-30	80-120

Капиллярная влагоемкость - это то количество влаги, которое почва содержит в капиллярах за счет подтока из грунтовых вод. Капиллярная влага легко доступна растениям. Почва находится в мягком состоянии, что затрудняет ее обработку.

Полная влагоемкость характеризуется заполнением водой всех пор почвы. При этом почвенный воздух вытесняется водой, что прекращает аэрацию почвы и вызывает угнетение растений. Такое избыточное увлажнение почвы в природе наблюдается, когда грунтовые воды поднимаются до поверхности почвы. В Нечерноземной зоне полная влагоемкость наблюдается весной, когда нижние слои почвы еще не оттаяли, а верхние переувлажнены талыми водами. Проведение полевых работ при этом невозможно.

Свободная вода, поступившая в почву, изменяет свой энергетический уровень под влиянием водоудерживающих сил. К водоудерживающим силам почвы относят менисково - пленочные, осмотические, адсорбционные силы [6, с.172].

Энергия удержания (всасывания) воды почвой измеряется потенциалом влаги. Потенциалом почвенной влаги называют работу, затраченную на преодолении водоудерживающих сил при извлечении из почвы единицы массы влаги. В почве в состоянии водонасыщенности-

величина потенциала влаги близка к потенциалу чистой воды, и его можно принять за 0.

Кривая, характеризующая зависимость между капиллярно-сорбционным потенциалом и влажностью почвы, называется кривой водоудержания. Абсолютная влажность, характеризующая общее содержание влаги в почве, определяется по выражению [8]

$$\omega_a = \frac{m_b}{m_{асп}}, \quad (2.3)$$

где ω_a - абсолютная влажность почвы;

m_b - масса воды в почвенном образце;

$m_{асп}$ - масса абсолютно сухой почвы.

Относительная влажность дает представление о степени насыщения почвы влагой и позволят сравнить влажности почв, отличающихся по величине влагоемкости. Относительную влажность почвы определяют по формуле

$$\omega_{отн} = \frac{\omega_a \times 100}{\omega_{овп}}, \quad (2.4)$$

где $\omega_{овп}$ - общая влагоемкость почвы.

Величина относительной влажности характеризует степень смоченности почвы.

Влажность почвы существенно влияет как на расход энергии при обработке почвы, так и на качество производимой работы [44]. При вспашке пересохших (воздушно - сухих) суглинистых и глинистых почв, не имеющих водопрочной структуры, происходит образование крупных глыб, диаметр которых часто достигает 0,5 м. В этих условиях работы тяговое сопротивление плуга максимально. Измельчить глыбы, образующие при вспашке пересохшей почвы, невозможно ни катками, ни боронами. Они могут быть полностью ликвидированы лишь в результате осеннего увлажнения почвы и последующего промерзания, оттаивания и своевременного весеннего боронования.

Отрицательные результаты дает и вспашка переувлажненных связных почв (при относительной влажности более 80%). При обработке бесструктурных почв пласт, сохраняя форму сплошной ленты, остается слабовзрыхленным, его поверхность после оборота блестит, так как отвал “заиливает” пласт. После просыхания почвы такая пашня непригодна для посева. При вспашке сильно увлажненных структурных почв происходит сильное залипание отвалов и сгуживание почвы

впереди корпусов плуга. При этом происходит неполный оборот пласта, растительные остатки заделываются плохо.

Влажность почвы является одним из показателей, влияющих на твердость, коэффициент Пуассона, модуль упругости первого рода, коэффициент удельного сопротивления почвы деформации.

2.3 Твердость почвы

Одной из существенных характеристик механических свойств почвы является ее твердость, обязательное определение которой при испытаниях плугов, культиваторов и других машин предусматривается соответствующими ГОСТами.

Существуют различные формулировки твердости почвы. Твердость - свойство почвы в естественном положении сопротивляться сжатию и расклиниванию. В тоже время, твердость почвы - это сопротивление проникновению в нее деформатора. В качестве деформатора может быть использован конус, шар, цилиндр.

В отечественных твердомерах для твердых почвы в качестве деформатора применяют конус при вершине $22^{\circ}30'$ и основанием $1,0 \text{ см}^2$, для рыхлых почв используют конус с углом 30° и основанием $2,0 \text{ см}^2$. В.А. Желиговский и Ю.Ю. Ревякин считали, что для определения твердости почвы следует применять наконечник цилиндрической формы.

Твердость почвы определяется следующими факторами: количеством частиц в единице объема; пространственным распределением частиц; влажностью почвы; распределением влаги в объеме почвы; связями между частицами; распределением связей.

Чем больше количество частиц в единице объема, тем больше частиц вступает в контакт с деформатором. Тем меньше усилия приходится на частицу.

Связь между частицами формируется силами взаимного притяжения, минеральными и органическими частицами, минеральными частицами и частицами окисей, органическими частицами и частицами окисей. Большее количество точек контакта частиц увеличивает связь между ними.

Твердость определяют с десятикратной повторностью, а затем из этих определений выводят среднее значение. В тоже время есть другие рекомендации. Твердость почвы следует определять не менее чем в пятикратной повторности на площадке 1 м^2 . Одновременно берут образцы почвы на влажность.

Твердомеры бывают ударного и непрерывного заглубления. По форме получения результатов их разделяют на интегрирующие твер-

домеры и диаграммные. Для диаграммных твердомеров конструкции Ревякина твердость почвы рассчитывают по формуле

$$P = \frac{h \times g_{\text{п}}}{F_{\text{к}}}, \quad (2.5)$$

где h - среднее значение ординаты диаграммы твердомера;

$g_{\text{п}}$ - жесткость пружины;

$F_{\text{к}}$ - площадь основания конуса.

При использовании наконечника цилиндрической формы можно получить диаграмму, имеющую три характерных участка, которые соответствуют различным деформациям почвы (рис.2.5).

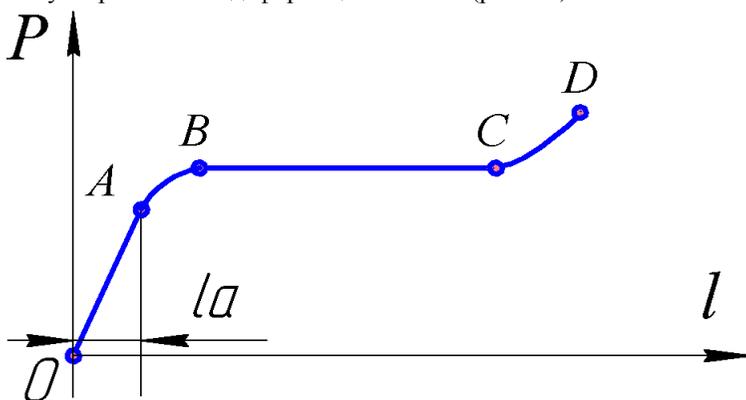


Рисунок 2.5. Кривая усилия от величины заглабления

Начальная фаза OA характеризуется почти линейным увеличением силы P по мере внедрения цилиндра. Эта фаза получила название фазы уплотнения. По участку диаграммы OA можно определить коэффициент объемного смятия

$$q = \frac{P_a}{F_{\text{ц}} \times l_a}, \quad (2.6)$$

где P_a - усилие, соответствующее пределу пропорциональности;

$F_{\text{ц}}$ - площадь основания цилиндра твердомера;

l_a - глубина вдавливания наконечника твердомера Ю.Ю. Ревякина, где преобладают упругие деформации.

Коэффициент q для свежеспаханной почвы составляет 1...1 Н/см³, жнивья, паров, лугов - 5...10 Н/см³.

П.У. Бахтиным было установлено, что при внедрении в почву наконечников с различной формой, но одинаковой площадью основания, различие в усилии наблюдается лишь в фазе ОА.

Участок **АВ** - участок нелинейной зависимости. Для этой фазы характерно образование впереди цилиндра конусообразного нароста из сильно уплотненной почвы.

Участок **ВС** - участок, характеризующийся непрерывным увеличением глубины погружения цилиндра при постоянном значении усилия **P**. На данном участке работает конусообразный нарост. Эту фазу называют фазой течения или фазой сдвигов.

По этой фазе можно определить показатель несущей способности почвы

$$P_{\text{нсп}} = \frac{P_b}{F_{\text{ц}}}, \quad (2.7)$$

где P_b - усилие, соответствующее пределу текучести.

2.4 Внешнее трение

Под трением понимается сопротивление скольжению одной поверхности по другой [31, с.425]. Сила трения всегда больше в самом начале скольжения. Началу скольжения соответствует переход от состояния покоя к движению. Поэтому различают два коэффициента трения - покоя и скольжения [12]. Коэффициент трения покоя называется статическим коэффициентом трения. Коэффициент трения скольжения называется динамическим коэффициентом трения.

Коэффициент трения покоя определяется с учетом определенного угла наклона поверхности, при котором тело начинает движение (рис. 2.6).

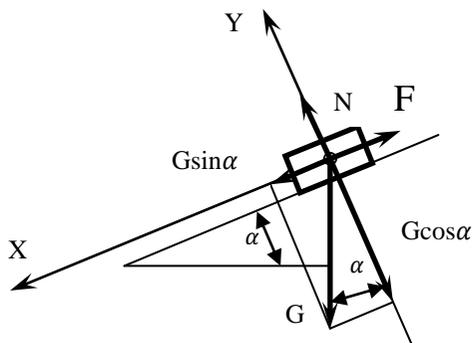


Рис. 2.6. К определению коэффициента трения покоя

$$\varphi = \arctg(f). \quad (2.8)$$

Таким образом, при наличии угла наклона поверхности, при котором тело начинает скольжение, можно и определить угол трения покоя.

При определении энергетических характеристик ряда почвообрабатывающих машин применяется коэффициент трения скольжения. Затраты на преодоление сил трения составляют в некоторых случаях 40...50% и более от их общего сопротивления рабочих органов. Величина коэффициента зависит от механического состава и влажности почвы, шероховатости рабочей поверхности, материала, используемого для изготовления рабочего органа, удельного давления на поверхности контакта и скорости скольжения [47, с. 15, 61].

Согласно теории И.В. Крагельского, коэффициент трения скольжения

$$f = \frac{\alpha_n \times \beta_n \times F}{N}, \quad (2.9)$$

где α_n , β_n - параметры, зависящие от механических и молекулярных свойств поверхности трущихся тел;

F - площадь соприкосновения тел;

N - сила нормального давления.

При наличии экспериментального определенного значения силы трения $F_{тр}$ коэффициент трения определяется с помощью формулы Амонтона [45, с. 38], предложенной в конце XVII века.

$$f_{внеш} = \frac{F_{тр}}{N}. \quad (2.10)$$

Сила трения и коэффициент трения определяется с помощью приспособлений различного рода. Так, силу трения можно измерить с помощью динамометра (рис.2.7). Перемещаемое тело при этом должно двигаться равномерно.

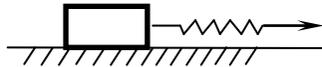


Рис. 2.7. Динамометр при определении силы трения

Более совершенной конструкцией является установка ВИСХОМ с дисковым прибором (рис. 2.8). Диск 1 расположен горизонтально и

вращается вокруг вертикальной оси. На нем находится каретка 2, закрепленная на трехплечем рычаге 3-4-6. Определив движущую силу с помощью динамометра, зная силу тяжести каретки, определяют угол и коэффициент трения.

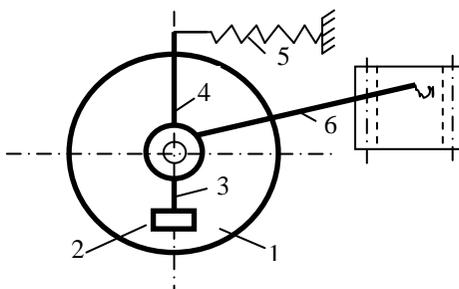


Рис. 2.8. Установка трения конструкции ВИСХОМ

Прибор, разработанный профессором В.А. Желиговским, предназначен также для определения угла и коэффициента внешнего трения. Прибор состоит из следующих узлов (рис. 2.9.). На жестко закрепленной направляющей 1 скользит втулка 2. К втулке 2 под регулируемым углом крепится линейка 3. На поверхности линейки 3 скользит каретка 4. Внутри каретки 4 расположен объем почвы. Также к каретке 4 крепится карандаш 5. Параллельно направляющей 2 расположена вертикальная стенка 6, на которой закрепляется миллиметровая бумага.

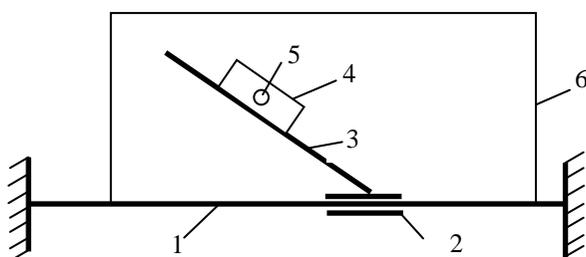


Рис. 2.9. Прибор профессора В.А. Желиговского

При движении каретки на почву действует сила тяжести G , сила нормального давления линейки N , сила трения $F_{тр}$ (рис. 2.10).

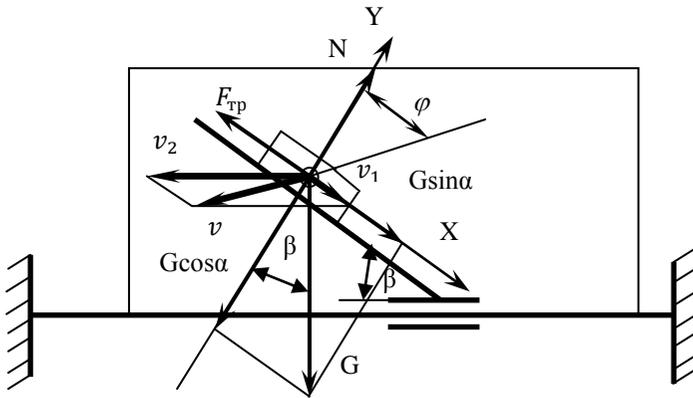


Рис.2.10. Воздействие сил на почвенную каретку

При движении каретки с почвой вниз скорость v_1 будет направлена вдоль линейки. При движении каретки влево скорость v_2 также будет направлена влево.

Угол между направлением абсолютной скорости v и реакцией поверхности линейки дает искомый внешний угол трения $\varphi_{\text{внеш}}$.

Из всего многообразия факторов, влияющих на коэффициент трения скольжения, определяющее значение все же оказывает механический состав почвы и ее влажность.

На рисунке 2.11 представлен график зависимости коэффициента внешнего трения от содержания в почве «физической глины».

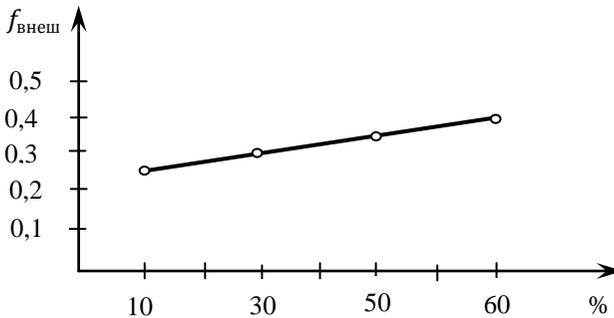


Рис. 2.11. Зависимость коэффициента внешнего трения от содержания в почве физической глины

Из графика видно, что с увеличением значения содержания физической глины увеличивается и коэффициент внешнего трения почвы. При содержании физической глины в объеме 10% коэффициент трения составляет 0,26. При содержании физической глины в объеме 60% коэффициент трения составляет 0,4. Значения коэффициента трения $f_{\text{внеш}}$ и угла трения $\varphi_{\text{внеш}}$, определенные при давлении 20...100 Па и скорости скольжения почвы 0,4м/с по шлифованной стальной поверхности для некоторых типов почв, представлены в таблице 2.3 [6].

Таблица 2.3

Коэффициент и угол внешнего трения почвы о сталь

Тип почвы по механическому составу	$f_{\text{внеш}}$	$\varphi_{\text{внеш}}$
Песчаная и супесчаная (рыхлая)	0,25...0,35	14°...19°30'
Песчаная и супесчаная (связная)	0,50...0,70	26°30'...35°
Легко и среднесуглинистая	0,35...0,50	19°30'...26°30'
Тяжелая суглинистая и глинистая	0,40...0,90	22°...42°

На рисунке 2.12 представлен график зависимости коэффициента внешнего трения песчаной, супесчаной почвы, тяжелого суглинка и глины от значений абсолютной влажности почвы.

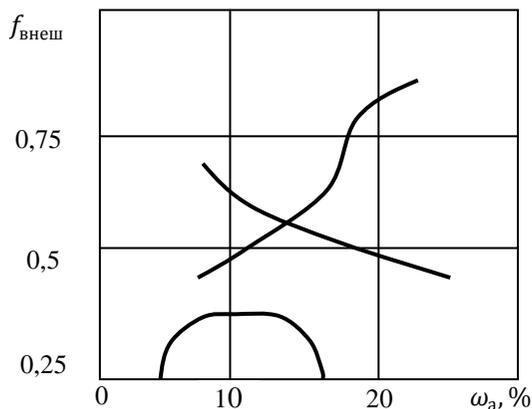


Рис. 2.12. Зависимость коэффициента трения почвы о сталь от влажности: 1 - песчаная; 2 - супесчаная; 3 - тяжелые суглинки и глины

Из рисунка 2.12 видно, что для разных почв при определенном механическом составе характерна своя тенденция изменения коэффициента внешнего трения от влажности. Так, для песчаной почвы минимальное значение коэффициента трения соответствует влажности 5% и 15%. А максимальное значение соответствует значению абсолютной влажности 10%. При низкой влажности частицы песчаной почвы, соприкасаясь с поверхностью, перекатываются по ней, что приводит к уменьшению коэффициента трения скольжения.

Для супесчаной почвы характерна тенденция уменьшения коэффициента трения с увеличением значений абсолютной влажности почвы. Для тяжелых суглинков и глин характерна тенденция увеличения коэффициента трения скольжения при увеличении значений абсолютной влажности почвы. Тем не менее, данное утверждение недостаточно точно [23, 38]. Так, на рисунке 2.13 представлена зависимость коэффициента внешнего трения глинистой почвы от значений абсолютной влажности в интервале от 10% до 60%.

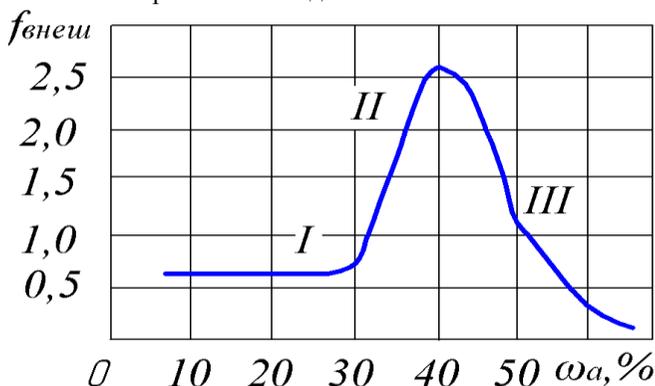


Рис. 2.13. Зависимость коэффициента внешнего трения глинистой почвы от значений абсолютной влажности

На I участке (фаза сухого трения) при относительно низкой влажности почвенная влага не поступает к материалу. И коэффициент трения является величиной постоянной. На II участке (фаза прилипания) коэффициент трения резко возрастает за счет возникновения сил молекулярного притяжения между почвенной влагой и материалом. Максимальное значение коэффициента трения соответствует влажности 40%. На третьем участке коэффициент трения резко снижается за счет того, что влага играет роль смазки.

Так, в результате экспериментальных исследований установлена зависимость коэффициента внешнего трения от значений абсолютной влажности почвы из-под люцерны [44, с.145].

$$f_{\text{внеш}} = -0,228 + 0,0695 \times \omega_a - 0,0012\omega_a^2 \pm 0,04. \quad (2.11)$$

Шероховатость поверхности также, но в незначительной степени, влияет на значения коэффициента трения скольжения. Так, коэффициент трения для чистошлифованной стали ниже, чем нешлифованной. В тоже время полировка поверхности почти не изменяет его значения. Наиболее низкий коэффициент трения о почву имеют некоторые новые материалы. К ним относится тефлон, фторопласт, полиэтилен, капрон.

Увеличение удельного давления на поверхности контакта вызывает уменьшение значения коэффициента трения [47, с.15], так как при этом в результате уплотнения почвы на поверхность трения поступает свободная влага, оказывающая смазывающее действие.

Противоречивы данные о влиянии скорости скольжения на величину коэффициента трения. Но ряд ученых полагают, что изменение скорости скольжения почвы по стали в пределах 0,5 - 4 м/с не оказывает ощутимого влияния на величину коэффициента трения [47, с.17].

Для ориентировочных расчетов коэффициент трения принимают равным $f_{\text{внеш}} = 0,5$, что соответствует углу трения $\varphi_{\text{внеш}} = 26^\circ 30'$.

Для уменьшения сил трения и борьбы с прилипанием применяют различные методы: устанавливают пластинчатые или прутковые отвалы, рабочие поверхности покрывают антиадгезионными материалами, используют вибрацию рабочих органов, электросмазку, на рабочую поверхность подают воду, заменяют трение скольжения трением качения.

Эффект электросмазки достижим при пропускании через отвал корпуса постоянного тока, одноименного заряду почвы. Возникающая при этом благодаря электроосмосу водяная пленка уменьшает притяжение между трущимися поверхностями [6, с. 126].

Наиболее эффективным методом уменьшения сил трения оказался метод увеличения удельного давления пласта на рабочую поверхность в результате установки пластинчатых или прутковых отвалов, в котором используется способность рабочих поверхностей прутков и пластин самоочищаться [23, с. 22].

Можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением в почве содержания физической глины возрастает коэффициент трения скольжения;
2. Влияние значения абсолютной влажности на коэффициент трения скольжения почвы определенного механического состава неоднозначно;

3. При низкой влажности возникает или сухое трение, или трение скольжения переходит в трение качения. При достаточной влажности возникают силы молекулярного взаимодействия, повышающие значение коэффициента трения. При избыточной влажности влага будет играть роль смазки.

4. Увеличение шероховатости приводит к увеличению коэффициента трения скольжения, но в определенных условиях выступившая влага за счет увеличения удельного давления формирует водяную пленку, приводящую к уменьшению сил трения;

5. Принято, что в определенном интервале скоростей коэффициент трения скольжения является величиной постоянной.

2.5 Внутреннее трение

Показателем величины действующих в почве сил внутреннего трения является коэффициент внутреннего трения [9, с. 394]. Коэффициент внутреннего трения отражает проявление молекулярных сил, электростатического притяжения между частицами, кристаллизационных связей [62].

Угол внутреннего трения может быть определен косвенными или прямыми методами [26, с. 118]. При прямом методе угол внутреннего трения определяется на основе положения прямой предельного состояния, графическое построение которой осуществляется при наличии значения предела прочности почвы на сжатие $\sigma_{сж}$ и на растяжение σ_p . Одним из косвенных методов является экспресс-метод, разработанный в МАДИ А.Н. Зелениным [24]. Двумя исходными параметрами, служащими отправной точкой экспресс - метода, является величина абсолютной влажности почвы и твердость почвы, определенная с помощью динамического твердомера ДорНИИ. В тоже время существует выражение, с помощью которого можно перевести значения, полученные с помощью статического твердомера, в показания динамического твердомера

$$C_{уд} = (1,25 \dots 2) \times P, \quad (2.12)$$

где P - твердость почвы по показаниям статического твердомера;

$C_{уд}$ - твердость почвы по показаниям динамического твердомера.

Имея значение абсолютной влажности почвы, число пластичности определяется следующим образом

$$\omega_n = \omega_a - 8, \quad (2.13)$$

где ω_n - число пластичности.

Представленная на рисунке 2.14 номограмма служит для определения коэффициента сцепления C_0 и показателя консистенции B_K . Например, для при $C_{уд} = 10$ МПа и $\omega_n = 10\%$, показатель консистенции почвы $B_K = -0,15$, а коэффициент сцепления равен $C_0 = 32000$ Па.

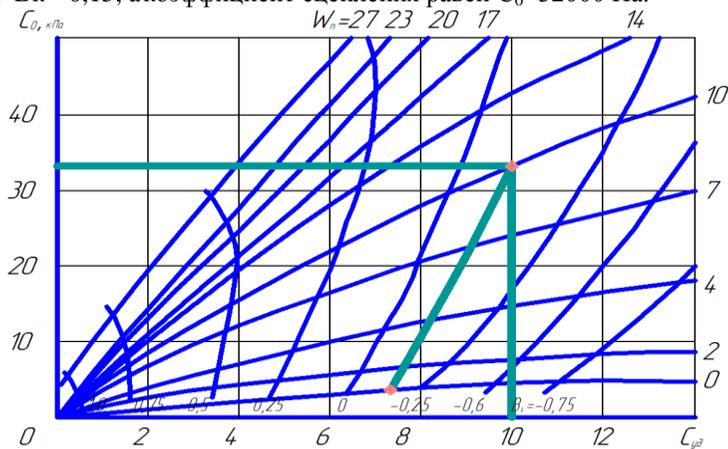


Рис. 2.14. Номограмма для определения коэффициента сцепления и показателя консистенции

Используя рисунок 2.15, на котором отображена номограмма для определения угла внутреннего трения, по значению показателя консистенции B_K и коэффициента сцепления C_0 , определяется искомое значение.

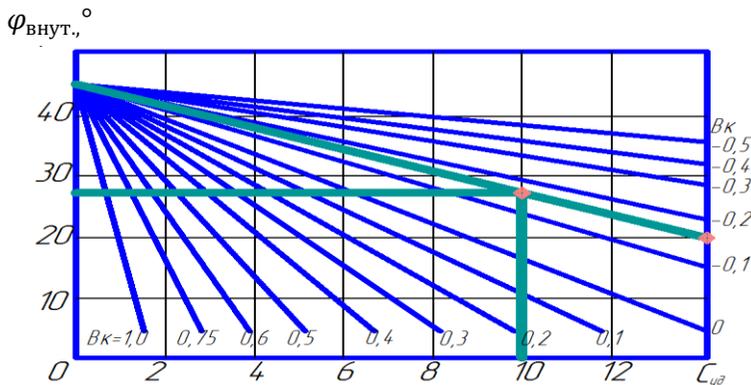


Рис. 2.15. Номограмма для определения угла внутреннего трения

При $V_k = -0,15$, $C_{уд} = 10$ МПа угол внутреннего трения составил $\varphi_{внут} = 27^\circ$. Исходя из представленной на рисунке 2.15 диаграммы, угол внутреннего трения не превышает 45° .

В таблице 2.4 приведены значения коэффициента внутреннего трения и значения абсолютной влажности среднесуглинистой почвы. Из таблицы 2.4 видна тенденция уменьшения угла внутреннего трения с увеличением значения абсолютной влажности. В интервале от 15...20%, 25...30% значений абсолютной влажности коэффициент внутреннего трения является величиной постоянной.

Таблица 2.4

Коэффициент внутреннего трения среднесуглинистой почвы

Абсолютная влажность, %	Коэффициент внутреннего трения	Угол внутреннего трения
3,6	0,60	30,97
6,5	0,64	28,38
7,8	0,47	25,19
15,4	0,40	21,82
20,3	0,40	21,82
25,4	0,33	18,27
30,2	0,33	18,27

В таблице 2.5 представлены значения коэффициента и угла внутреннего трения темно-каштановой тяжелосуглинистой почвы от абсолютной влажности почвы.

Таблица 2.5

Коэффициент внутреннего трения тяжелосуглинистой почвы

Влажность, %	Коэффициент внутреннего трения	Угол внутреннего трения, град.
8,5	3,2	72,68
10,2	1,6	58,02
12,9	0,73	36,15
17,7	0,73	36,15
20,9	0,40	21,81
26,0	0,33	18,27

Таким образом, угол внутреннего трения уменьшается с увеличением значения абсолютной влажности. Доказано, что коэффициент внутреннего трения уменьшается ступенчатого. Коэффициент внутреннего трения изменяется от 0,33 до 3,2.

2.6 Вязкость почвы

Вязкость - свойство почвы медленно деформироваться как в функции нагрузки, так и в функции времени. Вязкость почвы обусловлена взаимным перемещением составляющих ее фаз: твердой, жидкой и газообразной [20, 19, 36]. Чем продолжительнее действие нагрузки, тем значительнее деформация. Например, при движении трактора по болотистой почве (торфяники) глубина колеи больше, чем меньше скорость трактора, и наоборот. При вспашке, когда продолжительность действия нагрузки не превышает нескольких десятых долей секунды, вязкие деформации практически не успевают проявляться и ими можно пренебречь [23, с. 25].

Величина сила трения скольжения одного слоя по поверхности другого, в частности для жидкости, не зависит от давления между ними.

$$F_{\text{тр}} = \eta \times F_c \times \frac{du}{dn}, \quad (2.14)$$

где η - коэффициент, зависящий от физических свойств жидкости;

F_c - площадь соприкосновения двух слоев;

$\frac{du}{dn}$ - градиент скорости двух потоков.

В случае твердых тел сила трения зависит от нормального давления и практически не зависит от скорости движения, а также не зависит от площади соприкосновения.

Коэффициент η называется динамическим коэффициентом вязкости. Размерность динамической вязкости Па·с. Численное значение η для различных жидкостей находится опытным путем при помощи особых приборов, называемых вискозиметрами. В таблице 2.6 представлены значения показателя динамической вязкости для различного рода жидкостей.

Большой разброс опытных данных значений вязкости для грунтов объясняется не только разнообразием их свойств, но и в не меньшей мере различием в методике определения коэффициента вязкости, да и в самом понимании этой величины. Дело в том, что определение вязкости как $\eta = \frac{\tau}{tg\theta}$ справедливо лишь для идеально вязкой ньютоновой среды. Грунты же не подчиняются этому закону. У них зависимость между напряжением и скоростью течения нелинейна, а само течение вызывается не общей величиной напряжения τ , а разностью $\tau - \tau_t$ (где τ_t - предел текучести). Соответственно коэффициент вязкости будет переменной величиной, зависящий от величины приложенной нагрузки.

Таблица 2.6

Динамическая вязкость различного рода жидкостей

Наименование жидкости	Температура, t, °С	Значение показателя динамической вязкости, Па·с
Вода	0	0,001792
Вода	10	0,001306
Вода	20	0,001004
Вода	30	0,00802
Вода	40	0,00654
Вода	50	0,00549
Бензин	15	0,00065
Спирт этиловый	20	0,00119
Ртуть	15	0,00154
Скипидар	16	0,00160
Керосин	15	0,00217
Глицерин (50%)	20	0,00603
Масло трансформаторное	20	0,02750
Масло веретенное	20	0,04270
Масло турбинное	20	0,0860

Вследствие того, что некоторые авторы не учитывают указанного обстоятельства, полученные данные носят случайный характер. Точно так же следует иметь в виду, что понятие ньютоновой вязкости относится к процессу вязкого течения с постоянной скоростью. Грунты же, как большинство реальных тел, деформируются с переменной скоростью, и только на некотором этапе деформирования скорость становится постоянной. В соответствии с изложенным, понятие ньютоновой вязкости можно применить лишь к этому участку. К участку, где скорость деформирования является постоянной величиной. В остальных случаях вязкость следует рассматривать как переменную величину во времени.

Вязкость - характеристика сил внутреннего трения. Приборы для измерения вязкости называются вискозиметрами. Вискозиметры подразделяются на две группы. В основе принципа действия первой группы приборов лежит определение скорости вытекания жидкости из малого отверстия или из капилляра. К первой группе приборов относят вискозиметр ВЗ-246 и стандартная кружка ВМС.

Вторая группа приборов основана на определении скорости падения шарика в вязкой жидкости. В данном случае используется формула Стокса.

Указанные выше две группы приборов определяют вязкость через силу сопротивления движения. Данная вязкость называется динамической и измеряется в Па·с. Кинематическая вязкость - это вязкость, отнесенная к единичной плотности. Единицей измерения кинематической вязкости служит размерность м²/с. Обратная величина кинематической вязкости называется текучестью.

Вязкость различных сред меняется в весьма большом диапазоне: от $1,8 \cdot 10^{-4}$ Па·с для воздуха, 10^{-2} для воды, $0,5 \dots 10$ Па·с для различных масел и до $5 \cdot 10^{22}$ Па·с для земной коры. Что касается грунтов, то имеющиеся опытные данные по определению вязкости грунтов имеют разброс в значениях от 10^6 до 10^{17} Па·с. Так, по данным Г.В. Сорокиной, пластическая вязкость слабого глинистого ила составляет 10^6 Па·с, а по данным С.А. Роза - $(0,6 \dots 10) \cdot 10^{12}$ Па·с.

Вязкость майкопских глин полутвердой консистенции была определена в пределах $10^{12} \dots 10^{14}$ Па·с, для глин с влажностью 25% - $5 \cdot 10^{14}$ Па·с. Для лессовидных грунтов ($\omega_{отн} = 22\%$) было получено значение вязкости, равное $2 \cdot 10^{13} \dots 4 \cdot 10^{14}$ Па·с.

Согласно опытам, проведенным во ВНИИГе А.Н. Ермаковой, пластичная вязкость некоторых глин оказалось равной: у пасты из кембрийской глины ($\omega_{отн} = 24 - 27\%$) - от $1,5 \cdot 10^9$ до $8 \cdot 10^{12}$ Па·с; у пасты из лангарского лессовидного суглинка ($\omega_{отн} = 13 - 21\%$) - $3,6 \cdot 10^{10}$ до $2,1 \cdot 10^{14}$ Па·с; у пасты из хвольнской глины ($\omega_{отн} = 38\%$) - $1,5 \cdot 10^7$ до $1,8 \cdot 10^{10}$ Па·с; у той же глины ненарушенного сложения ($\omega_{отн} = 30 - 40\%$) - от $6,8 \cdot 10^9$ до $2,8 \cdot 10^{12}$ Па·с.

По данным исследований И.М. Горьковой, вязкость осадочных пород (в диапазоне малых нагрузок, когда течение происходит в условиях ненарушенной структуры грунтов) составляет: у песков пылеватых нарушенного сложения ($\omega_{отн} = 27 - 42\%$) - 10^7 Па·с; у илов Черного моря и озерных глин ($\omega_{отн} = 48 - 106\%$) - $10^8 \cdot 10^9$ Па·с; у илов Каспийского моря и послеледниковых морских глин ($\omega_{отн} = 49 - 70\%$) - $10^9 \cdot 10^{10}$ Па·с; у майкопских глин ($\omega_{отн} = 12 - 24\%$) - 10^{11} Па·с; у юрских глин Москвы ($\omega_{отн} = 32 - 45\%$) - $(2,5 \cdot 5,0) \cdot 10^{11}$ Па·с.

Н.Н. Маслов (1968) на основе анализа опытных данных (собственных и других авторов) считает возможным принять осредненные значения вязкости глинистых грунтов: мягко пластичной консистенции - $10^{10} \cdot 10^{11}$ Па·с; туго пластиной консистенции - $10^{12} \cdot 10^{13}$ Па·с; полутвердой консистенции - $10^{14} \cdot 10^{15}$ Па·с; твердой консистенции - $10^{15} \cdot 10^{17}$ Па·с.

Вязкость в быстро происходящих кратковременных оползнях оценивается величиной 10^{11} Па·с, а в медленно текущих откосах - от 10^{13} до 10^{14} Па·с. Значение вязкости (на стадии установившейся ползу-

чести) у некоторых горных пород было получено по данным лабораторных опытов А. П. Максимова и других авторов в следующих пределах: у глинистых сланцев - 10^{17} - 10^{18} Па·с; у песчаников и песчано-глинистых сланцев - 10^{18} - 10^{19} Па·с. В реологических процессах, протекающих в земной коре в течение геологических периодов времени, значение вязкости оценивается в 10^{20} - 10^{25} Па·с.

2.7 Предел прочности почвы на растяжение

Результаты исследования предела прочности почвы на растяжение используются, в частности, для расчета тягового сопротивления клина в методике, предложенной А.П. Осадчим [39]. Также с помощью значений предела прочности почвы на растяжение в совокупности со значениями предела прочности на сжатие строится круг Мора и определяется положение огибающей прямой. Угол между огибающей прямой и осью абсцисс дает значение угла внутреннего трения почвы.

Известны значения предела прочности при растяжении суглинистой почвы при влажности 21...28%. Так, в данном случае, временное сопротивление почвы растяжению составляет 5...6 кПа [73, с. 12]. Также известны величины предела прочности на растяжение глинистой почвы [23, с.12]. Причем, исследуемая величина неоднозначна и зависит от значений абсолютной влажности почвы. Экстремальное значение, равное 100 кПа, соответствует абсолютной влажности 22%.

По аналогии с пределом прочности на сжатие, уменьшение или увеличение порогового значения влажности, которое соответствует экстремальному значению, приводит к уменьшению величины предела прочности на растяжение.

Растяжение (разрыв) - самый малоэнергоёмкий вид деформации. Данному виду деформации противодействуют только силы сцепления почвы [9, с. 393]. Величина предела прочности на растяжение глинистого чернозема приведена в таблице 2.7. Из данной таблицы видно, что при увеличении влажности от порогового значения 21-23% предел прочности на растяжение снижается.

Таблица 2.7

Предел прочности почвы на растяжение

Влажность почвы, %	σ_p , г/см ²
21-23	61,8
23-25	52,5
26-28	50

Также получен ряд выражений, устанавливающих изменение величины предельного сопротивления почвы растяжению от скорости нагружения [43,7]. Так, Виноградовым В.И. получено следующее выражение при динамическом действии силы

$$\sigma_p^d = \sigma_0 + K \times \ln\left(\frac{V}{V_0}\right), \quad (2.15)$$

где σ_0 - временное сопротивление почвы растяжению при скорости нагружения $V_0 = 1 \text{ м/с}$;

V - действительная скорость нагружения;

K - коэффициент релаксации почвы.

В узком диапазоне изменения скорости зависимость между временным сопротивлением растяжению и скоростью деформации может быть описана следующим линейным уравнением

$$\sigma_p = \sigma_0 \times (1 + K \times V). \quad (2.16)$$

Виноградовым В.И. установлено то, что повышение скорости нагружения в 11 раз, увеличивает временное сопротивление растяжению только в 2 раза.

Подсребко М.Д. получены выражения для статического и динамического нагружения при разрушении почвенного образца растяжением.

Напряжение при статическом нагружении

$$\sigma_p = E \times \varepsilon + a \times \varepsilon^d + c, \quad (2.17)$$

где E - модуль упругости первого рода;

a, d, c - коэффициенты, зависящие от состояния почвы, особенно от влажности.

Временное сопротивление растяжению при динамическом нагружении

$$\sigma_p^d = \sigma_p \times e^{b \times V_{\text{пнк}}^2}, \quad (2.18)$$

где b - коэффициент, отражающий особенности условий нагружения почвенного образца;

$V_{\text{пнк}}$ - скорость перемещения подвижного края образца относительно неподвижного.

Параметр b определяется по выражению

$$b = \frac{A \times T}{2 \times l_0}, \quad (2.19)$$

где A - коэффициент, определяющий свойства почвы;

T - период релаксации;

l_0 - начальная длина образца.

В узких пределах изменения скорости нагружения (0,4 – 2 м/с и 2 – 4 м/с) зависимость между прочностью почвы и скоростью нагружения можно считать линейной.

На основании изложенного, можно сделать следующий вывод. Предел прочности на растяжение, являясь самой малоэнергоёмкой величиной, отражает почву определенного мехсостава и зависит, в большей мере от влажности почвы, чем от скорости нагружения. Величина предела прочности на растяжение изменяется в довольно широких пределах.

2.8 Предел прочности почвы на сжатие.

Упругая составляющая относительной деформации

Знание прочностных свойств почвы позволяет наметить пути и методы снижения энергоёмкости ее механической обработки: правильно рассчитать и спроектировать рабочие органы, определить условия рационального их применения [23, с.12].

В процессе воздействия рабочих органов различного рода почва, в большей мере благодаря наличию слабых связей, подвергается случайной комбинации деформаций растяжения, сдвига, сжатия.

Наиболее энергоёмкой деформацией является деформация сжатия. Силам сжатия противодействуют все виды сцепления почвы. К ним относятся молекулярные силы сцепления твердых частиц, химические связи, менисковые силы поверхностного натяжения воды, силы трения зацепления и прилипания [9].

Если кубический или цилиндрический почвенный образец подвергается возрастающей нагрузке σ_1 при $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, то величина σ_1 в момент разрушения называется пределом прочности на сжатие.

Предел прочности почвы на сжатие равен

$$\sigma_{сж} = \frac{N}{F_T}, \quad (2.20)$$

где F_T - площадь сечения деформируемого тела.

Вопросами исследования почвы на сжатие занимались ученые, определяя воздействие катков и ротационных плугов на обрабатываемый пласт, изыскивая оптимальные режимы функционирования коммодавителей картофелеуборочных комбайнов [33, 30, 41].

Так установлено, что временное сопротивление (до начала крошения) [73, стр.12] при различных видах деформации изменяется в широких пределах. Суглинистая почва имеет временное сопротивление сжатию 65...108 кПа. На значение данного параметра оказывает влияние влажность почвы (рис.2.16).

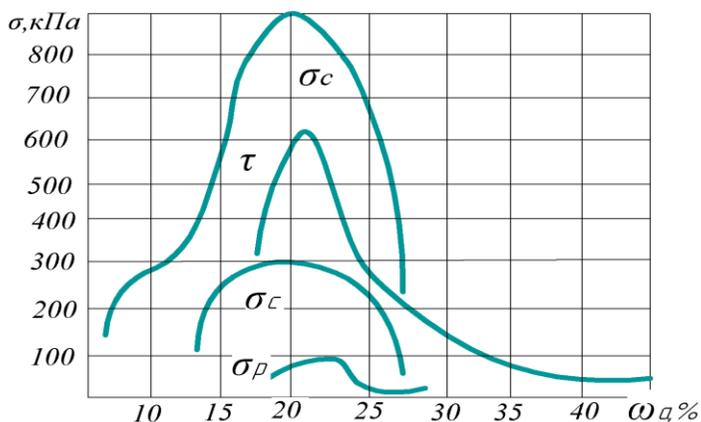


Рис. 2.16. Зависимость прочностных характеристик глинистой почвы

Так, максимальное значение данного параметра соответствует влажности 20%. При уменьшении и увеличении влажности величина предела прочности на сжатие уменьшается. Значения временного сопротивления сжатию глинистого чернозема приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Значения временного сопротивления сжатию

Влажность почвы, %	Предел прочности почвы на сжатие, г/см ²
12...16	1080,0
19...22	980,0
22...24	650,0

Для глинистого чернозема экстремальные значения предела прочности почвы на сжатие соответствуют абсолютной влажности 12 - 16%. Опять же с увеличением влажности значение данного показателя уменьшается. При увеличении влажности глинистого чернозема с 12% до 24% предел прочности на сжатие уменьшается почти в два раза.

Конструктивные изменения геометрии рабочих органов, осуществленные в пределах упругих величин относительных деформаций обрабатываемой почвы, позволит осуществить технологический процесс при минимальном разрушении почвенных частиц.

При испытании на одноосное сжатие суглинков установлено, что величина упругой составляющей относительной деформации почвы ε_y существенно зависит от влажности [37]. При влажности 8,4% упругая составляющая относительной деформации находится в пределах 1,5%. При влажности 12,2 - 2%. То есть с увеличением значений абсолютной влажности величина упругой составляющей увеличивается.

Упругая составляющая относительной деформации почвы, как и предел прочности на сжатие, характеризуют почву определенного гранулометрического состава и существенно зависят от ее значений абсолютной влажности.

2.9 Модуль упругости первого рода

В настоящее время для определения напряжений в почве используется метод конечных элементов, где параметры среды представлены модулем упругости первого рода E и коэффициентом Пуассона μ .

Модуль упругости первого рода отображает упругие деформации. Упругие деформации по закону Гука распространяются в сплошных средах с высокой скоростью. Эта скорость равна скорости звука в материале [11, с. 57]. Упругий модуль может быть измерен в лаборатории, используя динамические трехосные испытания или резонаторные испытания образцов в условиях одноосного сжатия [1, 79, 72, 78]. Для почв средних по механическому составу модуль упругости первого рода составляет $E = 2\text{МПа}$ [77].

В механике грунтов и в земледельческой механике используется понятие «модуль деформации» [29]. Модуль деформации E_d учитывает две составляющие: упругую и пластическую. Значения модуля деформации для различного рода грунта представлено в таблице 2.9.

Исследования, выполненные в институте [4] «Фундаментпроект» (А.А. Добровольский) показали, что между модулем упругости и мо-

дулем деформации имеется следующая зависимость, которая получена путем испытания различных грунтов в стабилометре.

$$E_d \approx 8 \times E, \quad (2.20)$$

где E_d – модуль деформации, МПа.

Таблица 2.9

Значение модуля деформации

Вид грунта	Модуль деформации, МПа
Очень мягкие глины	0,5...5
Мягкие глины	5...20
Полутвердые глины	20...50
Твердые глины	50...100
Опесчаные глины	25...200
Рыхлые пески	10...20
Плотные пески	25...100
Гравелистые грунты	100...200

Начальные значения модуля деформации, соответствующие его упругому поведению, то есть модуль упругости первого рода E , определяются с использованием касательной к начальному участку кривой зависимости «осевое напряжение – осевая деформация». В опытах для этого необходимо измерить осевую деформацию ϵ_1 с высокой точностью, порядка не более 10^{-3} мм, прикладывая очень малые ступени осевого (нормального) напряжения σ_1 .

Определить упругую составляющую модуля деформации можно при использовании гиперболической формы связи между напряжением и деформациями (рис.2.17).

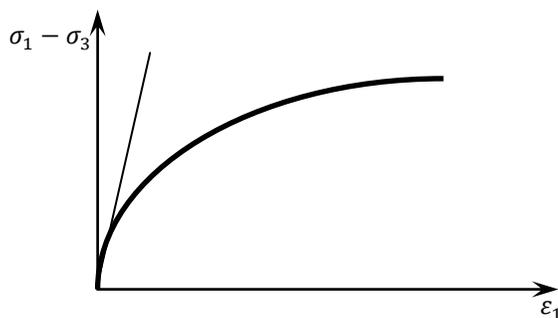


Рис.2.17. К определению упругого модуля деформации

Начальный модуль деформации E определяется из выражения

$$E = \frac{1}{a}, \quad (2.21)$$

где a - коэффициент соответствия (рис. 2.18).

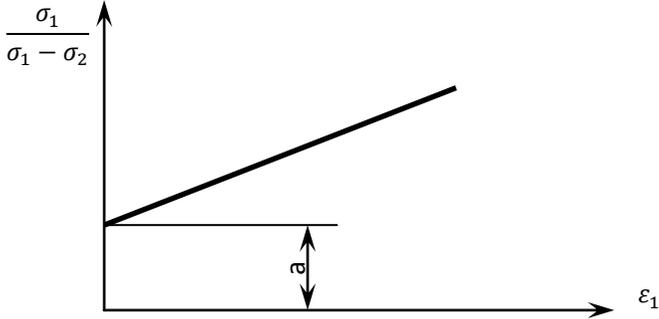


Рис. 2.18. К определению параметра a

Резонаторные колебания в целом сводятся к определению частоты собственных колебаний [15, 17]. На рисунке 2.19 зарисован почвенный образец, который был сжат продольной силой S , приложенной к верхнему свободному краю.

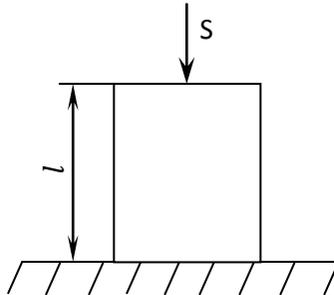


Рис. 2.19. Сжатие образца продольной силой

Используемые допущения: материал однороден, изотропен и следует закону Гука; сечения при колебаниях образца остаются плоскими; частицы, лежащие в этих сечениях, совершают движения только в направлении оси почвенного образца; вес выделенного фрагмента не

учитывают. А.С. Кушнеревым получено следующее выражение для определения модуля упругости первого рода

$$E = \frac{4\pi^2 f^2 l^2 \gamma}{Kg}. \quad (2.22)$$

В виду сравнительной сложности определения при использовании весьма точных приборов для измерения деформаций и больших затрат времени, модули упругости для почвы изучены слабо и экспериментальных данных имеется немного, причем эти данные вследствие различия в методах определения не всегда сопоставимы.

2.10 Коэффициент Пуассона

Коэффициент Пуассона [11, с. 42] в сопротивлении материалов связан только с упругой деформацией сред. Зависимость коэффициента Пуассона с тремя главными напряжениями, относительными деформациями, модулем упругости первого рода описывается формулами, которые носят название обобщенного закона Гука [25, 13].

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \mu(\sigma_2 + \sigma_3); \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \mu(\sigma_1 + \sigma_3); \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \mu(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (2.25)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - величины относительных деформаций в направлении главных напряжений;

μ - коэффициент Пуассона.

Коэффициент Пуассона - абсолютная величина отношения поперечной и продольной деформаций. Этот коэффициент зависит от природы материала.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|, \quad (2.26)$$

где ε' - деформация в поперечном направлении.

Коэффициент Пуассона имеет совершенно определенное значение для каждого материала. В упругой зоне коэффициент μ постоянен, а в пластической данный параметр является переменной величиной. В таблице 2.10 приведены диапазоны модуля упругости первого рода E и коэффициента Пуассона μ для различных материалов.

Таблица 2.10

Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона

Материал	Модуль упругости первого рода, E , МПа	Коэффициент Пуассона
Сталь углеродистая	$(2...2,1) \times 10^5$	0,25...0,33
Медь	$1,1 \times 10^6$	0,31...0,34
Алюминий	$0,69 \times 10^5$	0,32...0,36
Бетон	$(0,146...0,232) \times 10^5$	0,18

Для разных материалов μ колеблется от 0 до 0,5, в среднем изменяясь от 0,25 до 0,33 [17]. Для парафина $\mu = 0,5$.

В механике грунтов коэффициент Пуассона называется коэффициентом поперечного (бокового) расширения, коэффициентом поперечной деформации, коэффициентом бокового распора.

Коэффициент бокового расширения грунта (аналогичный коэффициенту Пуассона) равен

$$\mu = \frac{E_{об} - E_{д}}{2 \times E_{об}}, \quad (2.27)$$

где $E_{об}$ — модуль объемной деформации грунта.

Коэффициент бокового распора также соответствует определенному состоянию грунта и определяет его поперечную деформируемость. Коэффициент бокового распора будет постоянен для тех грунтов, механические свойства которых не зависят от перемещения воды в пустотах. Это относится к крупнозернистым, хорошо фильтрующим, скелетным грунтам. В данных грунтах поровая вода свободно передвигается между зернами скелета, не принимает участие в создании реакции сжимающей силы.

При кратковременном нагружении увлажненных грунтов, влага, находящаяся в пустотах, не успевает прийти в движение, вследствие чего грунт проявляет себя как единой целое [38]. Коэффициент деформации различного рода грунтов приведен в таблице 2.11 [48].

Таблица 2.11.

Значения коэффициента поперечной деформации

Грунты		Коэффициент поперечной деформации
Крупнообломочные грунты		0,27
Пески и супеси		0,30...0,35
Суглинки		0,35...0,37
Глины припокатели текучести	$I_L < 0$	0,20...0,30
	$0 < I_L \leq 0,25$	0,30...0,38
	$0,25 < I_L \leq 1$	0,38...0,45

Коэффициент Пуассона также связан с коэффициентом бокового давления следующей зависимостью [74, 10].

$$\xi = \frac{\mu}{1-\mu}, \quad (2.28)$$

где ξ – коэффициент бокового давления.

В свою очередь, коэффициент бокового давления ξ есть отношение приращения горизонтального давления грунта dq к приращению действующего вертикального давления dP .

$$\xi = \frac{dq}{dP}. \quad (2.29)$$

Для песчаных грунтов коэффициент бокового давления $\xi = 0,25...0,37$. Для глинистых грунтов в зависимости от консистенции $\xi = 0,11...0,82$ [75].

С учетом изложенного, можно сделать следующий вывод. Коэффициент Пуассона характеризует конкретную почву и ее определенное состояние. В зависимости от влажности и скорости нагружения данный параметр, возможно, изменяет свои значения.

2.11 Тела скольжения

При взаимодействии с почвой вертикальных профилей по ходу движения рабочего органа образуется тело скольжения, основным компонентом которого является уплотненное ядро.

Так, профессор В.Г. Березанцев выяснил, что уплотненное ядро приводит грунт в состоянии предельного равновесия. При этом образуется более удлиненная, неупругая часть ядра. В процессе погружения штампа положение вершины и ее очертания непрерывно изменяются, как бы выискивая направление наименьшего сопротивления для сдвига прилегающих к ядру масс грунта [75, с. 325]. Установление истинного направления движения частиц в грунте объясняет природу образования так называемых тел скольжения [18]. Теория Кулона, являясь универсальной, построена на плоских поверхностях скольжения (рис. 2.20), проводимых через нижнее ребро стенки под произвольным углом.

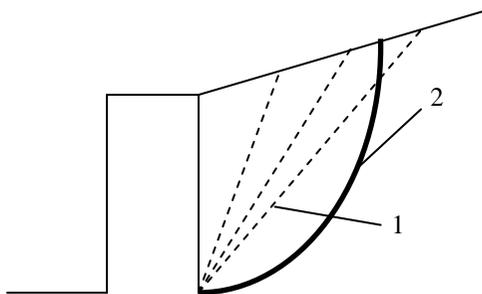


Рис. 2.20. Схема возможных поверхностей скольжения:

1 - плоская поверхность скольжения;

2 - криволинейная поверхность скольжения

Впервые криволинейность поверхностей скольжения установил профессор В. И. Курдюмов в 1889 году. Очертание линий скольжения для общего случая давления грунта на наклонную подпорную стенку с любой загрузкой поверхности получено проф. В.В. Соколовским. Согласно решению строгой теории равновесия, линии скольжения в общем случае будут криволинейными и представляют семейство логарифмических спиралей (рис. 2.21).

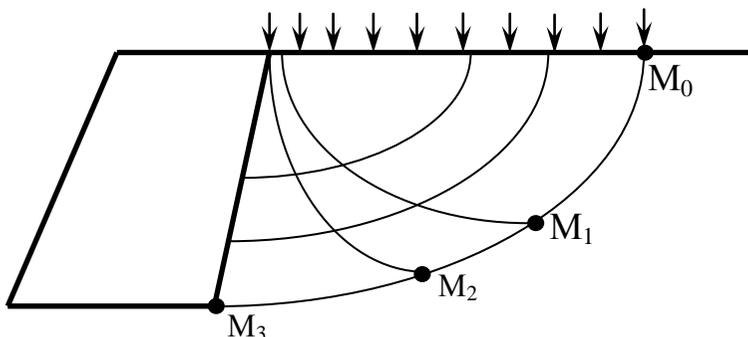


Рис. 2.21. Поле линий скольжения для общего случая давления грунта на подпорную стенку

Из эмпирических методов построения линий скольжения, которые ограничивают блок почвы, участвующий в деформации одного цикла [70], известен метод Одэ и С.С. Голушкевича.

Метод Одэ предполагает форму линии скольжения, состоящей из двух участков: логарифмической спирали и прямой линии. Текущий радиус-вектор логарифмической спирали

$$r_i = r_0 \times e^{\theta_1 tg \varphi_{внут}}, \quad (2.30)$$

где r_i - текущий радиус-вектор логарифмической спирали;

r_0 - начальный радиус-вектор;

θ_1 - текущий полярный угол;

$\varphi_{внут}$ - угол внутреннего трения почвы.

Метод С.С. Голушкевича заключается в следующем. Пусть, например, необходимо определить форму линии скольжения грунта перед вертикально расположенной подпорной стенкой (рис. 2.22).

Линия скольжения будет состоять из двух участков: прямой линии и логарифмической спирали. Положение прямой линии B_1B_1 и A_1B_2 определяется с помощью характеристических кругов Голушкевича (рис.2.23). Первоначально задается величина внутреннего угла трения почвы $\varphi_{внут}$.

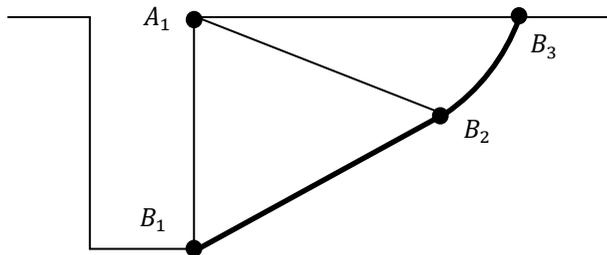


Рис. 2.22. К использованию метода Голушкевича

С учетом значения данного угла строится прямоугольный треугольник ABC в произвольном масштабе при условии $\angle ABC = \varphi_{\text{внут.}}$. Из вершины прямого угла опускаем перпендикуляр AD на гипотенузу. Из вершины C проводим три окружности радиусом CD , CA , CB . Окружность, описанная радиусом CD , называется кругом площадок. Окружность, описанная радиусом CA , называется кругом вершин. Окружность, описанная радиусом CB , называется кругом полюсов.

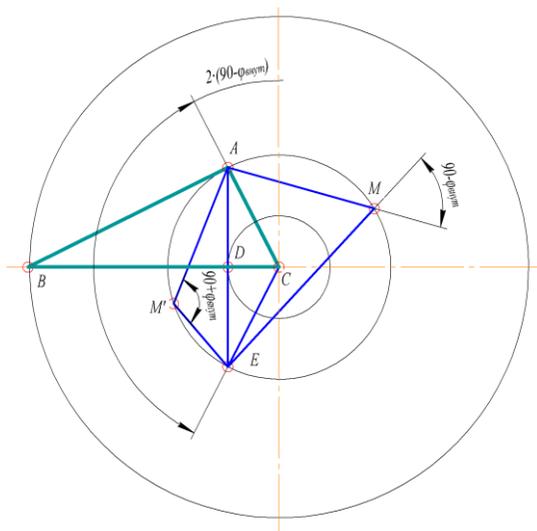


Рисунок 2.23. Характеристические круги С.С. Голушкевича

При продолжении перпендикуляра AD до пересечения с окружностью вершин получаем точку пересечения E . Свяжем точку E с точкой C . Угол $ACE = 2 \times (90 - \varphi_{\text{внут}})$. На круге вершин разместим точку M . Свяжем ее с концами хорды AE , которая является касательной к кругу площадок. Из теоремы вписанных углов $\angle AME = \frac{1}{2} \angle ACE$. Разместим также точку M' на круге вершин. Свяжем точку M' с точками A и E . Угол $AME' = 90 + \varphi_{\text{внут}}$. Так как площадки скольжения в грунтовой среде, находясь в условиях предельного равновесия, пересекаются между собой под углом $90 - \varphi_{\text{внут}}$ или $90 + \varphi_{\text{внут}}$, то прямые MA и ME можно рассматривать как площадки скольжения. Площадка A_1B_1 (рис. 2.23) параллельна отрезку AE . Данный отрезок, который является хордой круга вершин, касается круга площадок. Всякие две прямые, проходящие через концы хорды и пересекающиеся на круге вершин, будут параллельны возможным площадкам скольжения, проходящим через концы рассматриваемой площадки. То есть, имеем: $B_1B_2 \parallel EM$, $A_1B_2 \parallel AM$. В последующем, кривая B_2B_3 строится с помощью текущего радиуса - вектора логарифмической спирали.

При движении профиля, независимо от его толщины, выдвигается вверх по плоскости клинообразное тело. Клинообразное тело на виде (рис. 2.24) сверху напоминает форму раковины. Данная форма соответствует по очертанию линиям равного давления [18, с. 55].

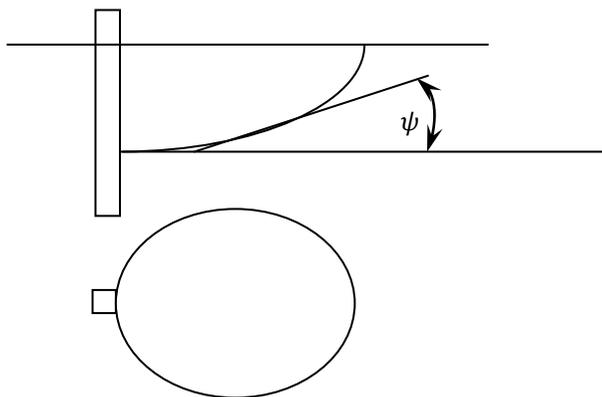


Рис. 2.24. Образование тела скольжения

2.12 О крошении пласта

Основным показателем, характеризующим водно-воздушный режим, создаваемый почвообрабатывающими орудиями, является показатель крошения почвы [14]. Данный показатель в значительной степени определяет аэрационную и водоудерживающую способность почвы [46]. Оптимальные условия функционирования корневой системы растений обеспечены тогда, когда общее содержание воздуха в почве составляет 15 - 25% суммарного объема пор, а концентрация кислорода составляет 10 - 15% [27].

После основной обработки почвы в пахотном слое [32] должно содержаться 70% и более комков размеров менее 50 мм, а после предпосевной в слое 0 - 10 см - 70% и больше комков размером менее 25 мм. В тоже время многие исследователи за оптимальное крошение принимают такое, при котором пласт имеет 50% комков диаметром 1...10 мм и 50 % комков диаметром 10...50 мм [44, с. 162].

Рыхление - изменение размеров почвенных комков и расстояние между ними, в результате чего улучшаются водо- и воздухопроницаемость почвы, а также ее биологическая активность [22]. Допустимое рыхление характеризуется содержанием почвенных частиц размером 1...10 мм и определяется коэффициентом рыхления

$$K_p = \frac{m_{1-10}}{m} \times 100\%, \quad (2.31)$$

где m_{1-10} - масса частиц размером 1...10 мм в пробе почвы;

m - масса пробы почвы.

При воздействии на почву рабочих органов почвообрабатывающих машин возникают деформации сжатия, сдвига, растяжения, при этом наиболее энергоемкими является деформация сжатия. Одной из целей воздействия является получение частиц почвы заданного размера в соответствии с агротехническими требованиями. Актуальным является вопрос о взаимосвязи размера частиц, свойств почвы, геометрии рабочего органа и его скорости воздействия на обрабатываемый пласт.

Так, при вспашке скорость движения агрегата является наиболее существенным фактором, влияющим на качество обработки почвы. Зависимость крошения от скорости движения плуга при вспашке и влажности почвы представляет собой кривую второго порядка [44, с. 168].

$$K = 0,954 \times v_{пл}^2 + 6,9 \times v_{пл} - 0,034 \times \omega_a^2 + 1,94 \times \omega_a + 97,47, \quad (2.32)$$

где $v_{пл}$ - скорость движения плуга.

При скорости 2,22 м/с крошение определяется по выражению

$$K = 0,034 \times \omega_a^2 + 1,94 \times \omega_a + 64,7. \quad (2.33)$$

В.С. Казаковым предложено в 1997 году степень рыхления почвы оценивать следующим выражением [21]

$$Q = \iint_S \operatorname{div} \bar{v} dF_{пч}, \quad (2.34)$$

где $F_{пч}$ - площадь поверхности почвенных частиц.

В основе теоретического обоснования крошения почвы лежит теория дробления или же массового разрушения твердых тел [34]. Теория дробления, в свою очередь, базируется на двух энергетических теориях: поверхностной и объемной.

Поверхностная теория [35], сформулированная немецким ученым П. Риттингером (1867), исходит из того, что работа, необходимая для дробления тела, прямо пропорциональна величине вновь образовавшейся в результате дробления поверхности

$$A_{др} = f(\Delta S). \quad (2.35)$$

Объемная теория, разработана (1874) русским ученым В.Л. Кирпичевыми и немецким профессором Ф. Киком (1885). В данной теории отражается прямая пропорциональность между величиной работы, затраченной на дробление тела, и его объемом (массой).

$$A_{др} = f(\Delta m). \quad (2.36)$$

Советский академик П.А. Ребиндер (1928) предложил оценивать работу измельчения следующим выражением

$$A_{др} = f(\Delta S) + f(\Delta m). \quad (2.37)$$

Данное уравнение названо основным законом измельчения, который учитывает работу деформации над объемом (массой) и работу на образовании новых поверхностей.

С учетом данного закона было предложено выражение для определения работы на дробление почвенных частиц при использовании ротационного плуга [77, с. 91].

$$A = \frac{\pi \times \sigma^2 \times D^3}{12 \times E} \times \lg \left(\frac{D^3}{d^3} \right), \quad (2.38)$$

где D - первоначальный диаметр комка почвы, поступающего на ротор;
 d - средневзвешенный диаметр почвенных частиц после разрушения комка почвы ротором.

В данном выражении основным моментом является то, что комки почвы имеют шарообразную форму.

Шарообразность почвенных частиц заимствована из теории фильтрации, которая пошла по пути построения упрощенных моделей реальной пористой среды [42]. В модели фиктивного грунта пористая среда представлена в виде множества шарообразных частиц одинакового размера. Все поры являются цилиндрическими. Расположены они параллельно друг другу. Все шарообразные частицы уложены во всем объеме одинаковым образом по элементам из восьми шаров. Наименее плотная укладка шаров - та, при которой центры восьми шаров помещаются в вершинах куба. Наиболее плотная укладка получается при расположении центров восьми шаров в вершинах ромбоэдра с углом ромба $\alpha_p = 60^\circ$.

Существует мнение, что энергоёмкость обработки почвы находится в прямой зависимости от степени ее крошения. Однако [71] разделение пласта на отдельные фракции может быть достигнуто не только за счет разделения его по геометрическим размерам, обусловленным траекторией движения режущих рабочих органов. На рисунках 2.25 и 2.26 показаны два способа дробления пласта. На рисунке 2.25 отражено механическое разрезание по сечениям, обусловленным траекторией движения рабочего органа.

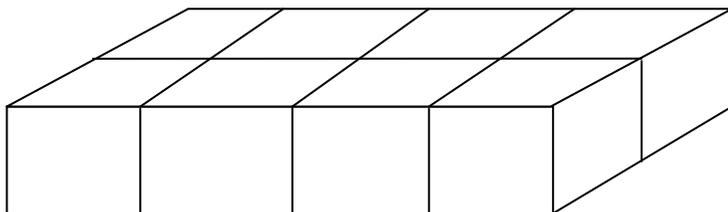


Рисунок 2.25. Механическое разрезание по сечениям

Механическое разрезание по сечениям характерно для машин с ротационными рабочими органами, в частности для фрез с вертикальной или горизонтальной осью вращения. Толщина стружки зависит от соотношения скоростей: поступательной и окружной.

На рисунке 2.26 показано дробление пласта на глыбы неопределенной формы.

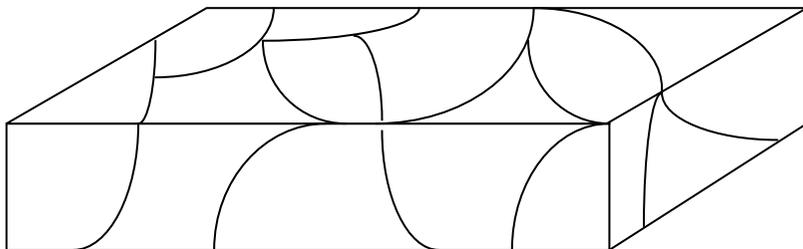


Рисунок 2.26. Дробление на глыбы неопределенной формы

Несмотря на то, что в обоих случаях конечным результатом является степень крошения пласта, однако затраты энергии в первом случае будут значительно больше. Это объясняется тем, что почва неоднородна по своей структуре и в ней имеются многочисленные поры, пустоты, трещины. Участки с плотно упакованными частицами могут быть разделены областями, где частиц меньше и они не прилегают тесно друг к другу. Рыхлые участки снижают сопротивляемость почвы, так как не обеспечивают опору более плотным участкам [28, с. 21]. Кроме того, почвенные частицы не всегда расположены хаотично. Могут наблюдаться четко выраженные скопления параллельно расположенных пластинчатых почвенных частиц. Кроме того, корневая система растений проникает в почву, расчленяет и дробит ее. Происходит сдавливание почвенных частиц вокруг корня, сближение, слипание. Сумма всех пор и трещин образует сечение слабых связей.

Таким образом, на основании выше изложенного можно сделать следующий вывод. Теоретическое обоснование крошения почвы, с одной стороны, должно согласно поверхностной и объемной теории дробления тел, включать величину удельной потенциальной энергии, накопленной частицей, с другой стороны, в связи с наличием слабых связей и случайного вида деформации [26, с. 118] экспериментально определенный коэффициент рыхления почвы.

3. Программа и методики экспериментальных исследований

3.1 Программа исследований

Для оценки теоретических исследований, направленных на обоснование формоизменения геометрии лемеха, необходимо получить зависимость величины модуля упругости первого рода, коэффициента динамической вязкости, углов внешнего и внутреннего трения, предела прочности почвы на растяжение и сжатие, коэффициента Пуассона от значений абсолютной влажности суглинистой почвы.

Для экспертной оценки результатов теоретических и экспериментальных исследований необходимо уточнить зависимость величины твердости суглинистой почвы от значений абсолютной влажности.

С целью определения удельной потенциальной энергии разрушения необходимо определить зависимость высоты падения, которая соответствует высоте разрушения от значений абсолютной влажности. Данный параметр позволяет определить допускаемые величины нормальных и касательных напряжений, определить тяговое усилие поверхности лемеха.

Для определения угла отбортовки лезвия лемеха необходимо определить зависимость величины упругой составляющей относительной деформации почвы при сжатии от значений абсолютной влажности.

С целью прогнозирования степени рыхления, необходимо установить зависимость между коэффициентом рыхления и величиной удельной потенциальной энергии суглинистой почвы.

Для определения большинства данных параметров использовались методики, предусмотренные ГОСТом. Для определения коэффициента Пуассона использовалась вновь разрабатываемая методика.

Для определения модуля упругости первого рода, предела прочности почвы на растяжение и сжатие, угла внешнего и внутреннего трения, необходимо использовать образцы суглинистой почвы ненарушенной структуры. Существуют различные конструкции пробоотборников для взятия образцов грунта ненарушенной структуры [43, 52]. Тем не менее, они не позволяют получить образец длиной более 0,1 м и диаметром 0,05 м.

С учётом вышеизложенного, был сконструирован и изготовлен пробоотборник (рис. 3.1), где в качестве ножа использовался разрезанный надвое цилиндр из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Кольцевой нож из двух половинок, каждая из которых имеет верхнюю и нижнюю кромку, две боковые грани, что обеспечивает беспрепятственное освобождение почвенного образца (рис. 3.2).

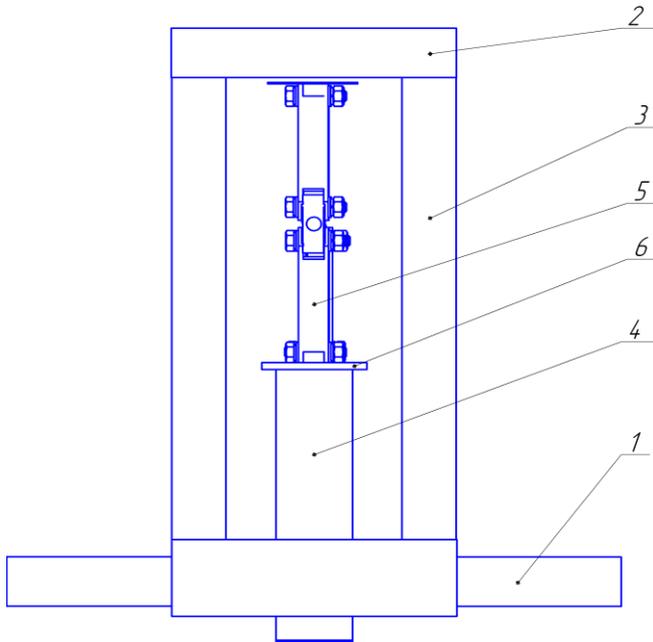


Рис. 3.1. Пробоотборник

Пробоотборник включает нижнее 1 и верхнее 2 основания, связанные между собой стойками 3. В нижнем основании 1 вмонтирована втулка для обеспечения радиальной устойчивости разрезанного надвое цилиндрического ножа 4. Заглубление ножа осуществляется с помощью винтового домкрата 5, усилие которого передаётся на рабочий орган с помощью шайбы 6. Сделанная в шайбе 6 концентрическая проточка также обеспечивает устойчивость ножа в радиальной плоскости.

После многократных испытаний при абсолютной влажности среднесуглинистой почвы в пределах 8 - 10 % и твёрдости 5,8 МПа была отмечена деформация режущей кромки и прилегающей к ней области с нарушением цилиндричности и пересечением краёв режущих элементов.

С целью определения целесообразной зоны термической обработки для повышения надёжности в работе, нами были проделаны расчёты в программе APM Winmachine в трёхмерном редакторе «Компас-3DV12» [53].



Рис. 3.2. Почвенный образец

Предварительным этапом расчёта является процедура закрепления и нагружения ножа. В данном случае верхняя кромка ножа находится в условиях жёсткой заделки. Нижняя кромка перемещается в трёх направлениях, боковины ножа зафиксированы в направлении оси X и Y (рис. 3.3), но имеют возможность перемещения в направлении оси Z . Нижняя кромка нагружена усилием 2500 Н в направлении оси Z .

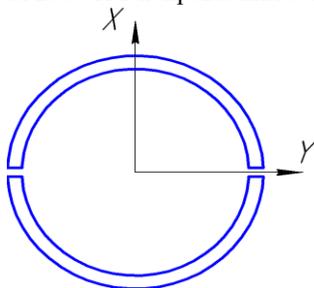


Рис. 3.3. К выбору координатных осей

При генерации сетки максимальная длина элемента составила 5 мм, максимальный коэффициент сгущения сетки на поверхности - 1, коэффициент разрежения в объёме - 1,5. Число конечных элементов составило 4701, узлов - 1664. Результатом выполнения статического расчёта является величина и характер распределения напряжений, деформаций и перемещений по поверхности ножа.

Максимальная величина напряжений составила 80,98 МПа с их локализацией у режущей нижней кромки. У краёв контура величина напряжений снижается. Величина напряжения на верхней кромке в два

раза меньше. В результате анализа деформаций в направлении осей X, Y, Z установлено, что максимальная относительная деформация режущей кромки протекает в направлении оси Z, что соответствует и максимальным перемещениям в данном направлении.

В тоже время для режущей кромки и для небольшого участка, прилегающего к ней, характерны деформации и перемещения в направлении оси X (рис. 3.4), которые и приводит к нарушению цилиндричности.

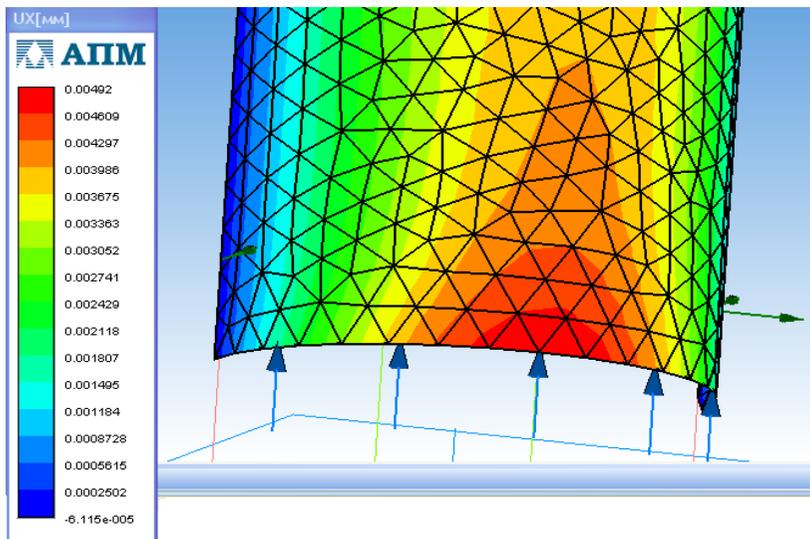


Рис. 3.4. Перемещения в направлении оси X

3.2 Методики проведения экспериментальных исследований

3.2.1 Методика определения влажности и твердости почвы

Влажность относится к самым распространенным и наиболее важным показателям качества сельскохозяйственных материалов и продукции. Кроме того, это один из основных показателей, характеризующих условия работы машин в полевых условиях.

Различают прямые и косвенные методы измерения влажности [2]. В случае использования прямых методов материал делят на сухое вещество

и воду. Среди прямых методов наиболее распространены различные модификации методов высушивания. Метод высушивания основан на воздушно - тепловой сушке образца материала до постоянной массы.

Сушку почвы осуществляли в сушильном шкафу (рис.3.5) при температуре 100...105° до тех пор, пока масса бюкса с почвой не перестает изменяться.



Рис. 3.5. Сушильный шкаф SNOL 67/350

После первого взвешивания образцы помещали в сушильный шкаф и через 1...2 часа проводили контрольное взвешивание (рис.3.6).



Рис. 3.6. Взвешивание бюкса на весах ACOM - JW-1

Если разность между предыдущим и контрольным результатами не превышает 0,05г, пробы помещались в эксикатор, охлаждались в течение 20...30 мин и взвешивались окончательно.

Для измерения твердости почвы использовали твердомер Ю.Ю. Ревякина (рис.3.7).



Рис. 3.7. Твердомер Ю.Ю. Ревякина

3.2.2 Методика определения угла внешнего трения почвы

Для определения зависимости коэффициента внешнего трения среднесуглинистой почвы от значений абсолютной влажности использовалась установка ТММ-32А №556 1982 года выпуска (рис.3.8) и измеритель деформаций ИТЦ - 03 2011 года выпуска.



Рис. 3.8. Установка ТММ - 32А

Данная установка включает основную раму и подвижную плиту [69]. На основной раме консольно закреплена пластина с прямоугольным сечением с наклеенными тензодатчиками. С левой стороны основной рамы размещен электродвигатель переменного тока, который гибким приводом связан с подвижной плитой. Почвенный образец диаметром $d = 50$ мм и высотой $H = 50$ мм помещался в пластмассовый колпачок, который был связан капроновой нитью с тензопластиной. Опыт осуществлялся в пятикратной повторности. Скорость движения была постоянной.

Для того чтобы определить усилие на перемещение почвенного образца было получено выражение, с одной стороны, учитывающее показания измерителя деформаций, с другой стороны, геометрические параметры пластины (рис.3.9) и ее модуль упругости первого рода.

Относительная деформация равна

$$\varepsilon = k \times \Delta, \quad (3.1)$$

где k - цена деления прибора ИТЦ - 03;

Δ - разница измерений до и после нагружения.

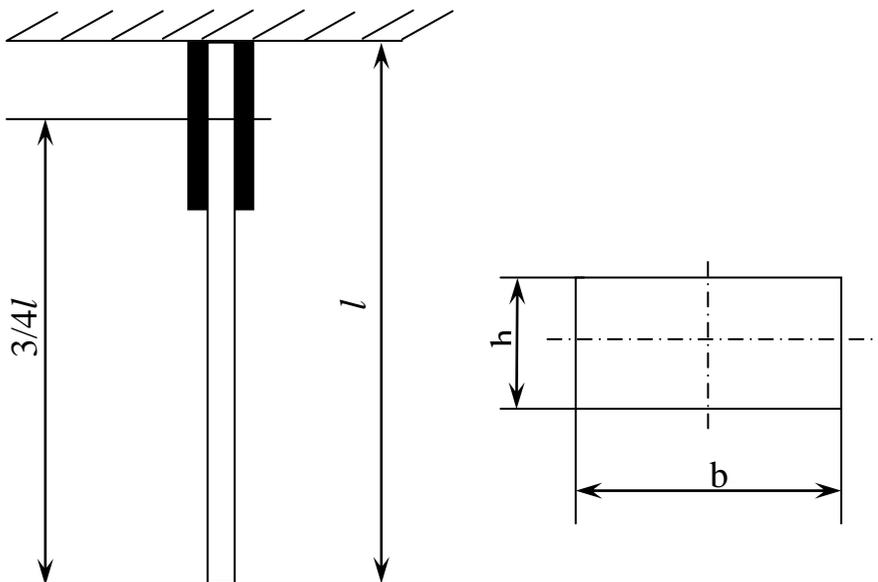


Рис. 3.9. Тензопластина

При известной величине относительной деформации величина нормальных напряжений

$$\sigma = \varepsilon \times E, \quad (3.2)$$

где E - модуль упругости первого рода тензопластины;

С учетом выражения (3.1) нормальное напряжение

$$\sigma = k \times \Delta \times E. \quad (3.3)$$

В тоже время

$$\sigma = \frac{M}{W_{но}}, \quad (3.4)$$

где M - изгибающий момент в сечении тензопластины;

$W_{но}$ - момент сопротивления сечения тензопластины.

Величина изгибающего момента

$$M = \frac{3}{4} \times P_{уп} \times l, \quad (3.5)$$

где $P_{уп}$ - величина усилия на перемещения;

l - длина тензопластины.

Момент сопротивления сечения тензопластины

$$W_{но} = \frac{b \times h^2}{6}. \quad (3.6)$$

С учетом выражений (3.5), (3.6) выражение (3.4) принимает вид

$$\sigma = \frac{9 \times P_{уп} \times l}{2 \times b \times h^2}. \quad (3.7)$$

При равенстве выражения (3.3) и выражения (3.7) усилие перемещения почвенного образца

$$P_{уп} = \frac{2 \times b \times h^2 \times k \times \Delta \times E}{9 \times l}. \quad (3.8)$$

Коэффициент внешнего трения

$$f_{внеш} = \frac{P_{уп}}{G_{по}}, \quad (3.9)$$

где $G_{по}$ - вес почвенного образца.

3.2.3 Методика определения угла внутреннего трения почвы

К одному из прямых методов определения угла внутреннего трения почвы относят неконсолидированное - недренированное испытание по траектории сжатия почвенных образцов в стабилометре (рис. 3.10, 3.11).

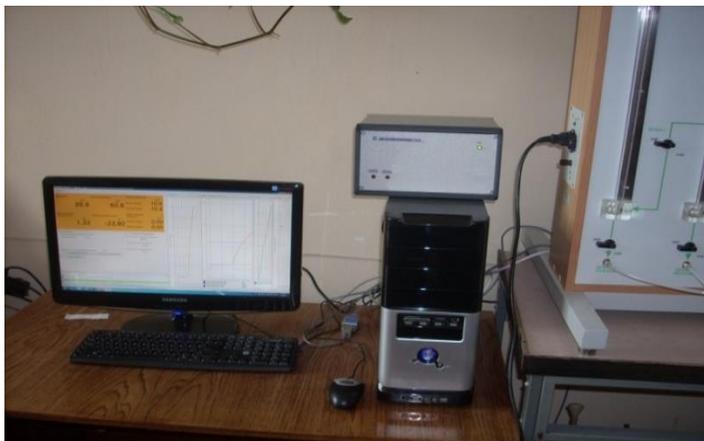


Рис. 3.10. Блок управления стабилометром



Рис. 3.11. Камера сжатия стабилометра

Использовать стабилومتر можно для определения как угла внутреннего трения, так и удельного сцепления, сопротивления недренированному сдвигу, модулей деформации, коэффициента поперечной деформации.

Образцы могут испытываться как в условиях статического, так и кинематического нагружения. Кинематическое нагружение осуществляется непрерывно с заданной скоростью.

Нагружение осуществляется при условии $\sigma_1 \gg \sigma_2 = \sigma_3$. В данном случае σ_1 - наибольшее главное напряжение, σ_2 - промежуточное главное напряжение, σ_3 - наименьшее главное напряжение.

Диаметр образца составляет 50 мм. Высота образца должны быть в 2 и более раза превышать диаметр. Для испытаний используют образцы грунта ненарушенного сложения. Испытание проводят по схеме неконсолидированное - недренированное.

При проведении испытаний в стабилometре измеряются четыре величины: осевая нагрузка, радиальная деформация, боковое давление, поровое давление.

При неконсолидированно - недренированных испытаниях стандарт BS 1377 рекомендует, чтобы скорость осевой деформации вызвала разрушение образца за период 5-17 мин.

3.2.4 Методика определения предела прочности почвы на растяжение

С целью определения предела прочности на растяжение средне-суглинистой почвы в качестве базового метода исследований применяется метод одноосного растяжения скальных грунтов, как наиболее надежный [11].

Предел прочности почвы на растяжение в данном случае определяется по следующему выражению

$$\sigma_p = 7,5 \times \frac{P_{pc}}{F_{np}} \times K, \quad (3.10)$$

где P_{pc} - разрушающая сила;

K - безразмерный коэффициент;

F_{np} - площадь поверхности разрушения.

Безразмерный коэффициент и площадь поверхности разрушения представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Площадь поверхности разрушения, коэффициент

S, см ²	K
3	0,67
4	0,72
5	0,76
8	0,85
10	0,9
15	1,00
20	1,08
30	1,19
35	1,24
40	1,28
45	1,32
50	1,35
80	1,52
100	1,6

Сущность данного метода заключается в измерении разрушающей силы, приложенной к образцу через стальные, встречно направленные сферические инденторы. Размеры образцов и места их нагружения должны быть такими, чтобы площадь поверхности разрыва (раскола) была не меньше 3 и не больше 100 см². Расстояние между точками приложения нагрузки должно быть не менее 10 мм. Количество образцов правильной формы должно быть не менее 6.

В качестве испытательной машины использована разрывная установка РМ - 0,5 со встречно направленными инденторами. На верхнем инденторе размещено тензометрическое кольцо (рис. 3.12). При использовании измерителя деформаций ИТЦ-03 цена деления составила 0,01Н.

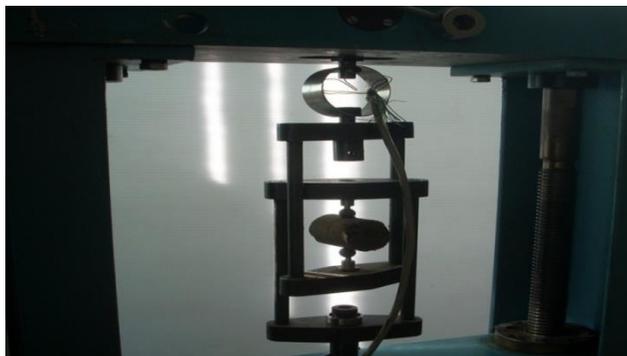


Рис. 3.12. Разрушение почвенного образца инденторами

3.2.5 Методика определения предела прочности и упругой составляющей относительной деформации почвы при сжатии

Для испытаний использовались почвенные образцы ненарушенной структуры, обладающие достаточным сцеплением, диаметр и высота которого были равны 0,05 м. Для деформации образца с постоянной скоростью нагружения применяли разрывную машину РМ - 0,5 (рис. 3.13). Образец нагружался до характерных проявлений линий излома, при которых почва начинает крошиться.

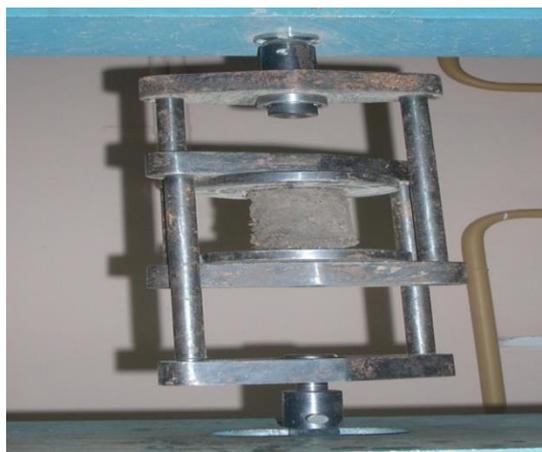


Рис. 3.13. Разрывная машина РМ-0,5

При одноосном нагружении получали зависимость напряжения сжатия от величины относительной деформации. Упругая составляющая ε_y определялась на основе анализа графика $\sigma - \varepsilon$ (рис.3.14).

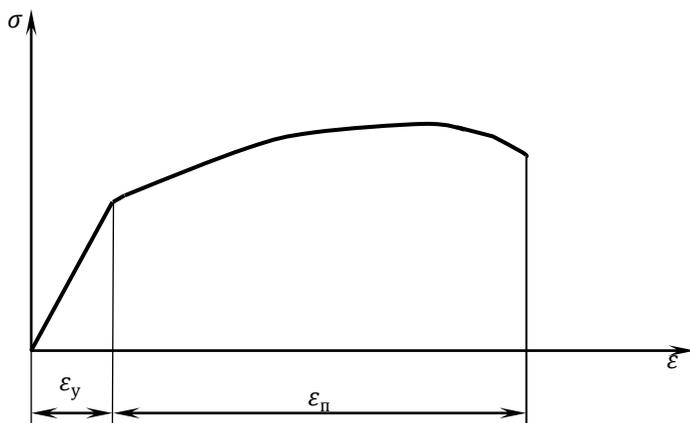


Рис. 3.14. График сжатия $\sigma - \varepsilon$

3.2.6 Методика определения модуля упругости первого рода

Края почвенного образца, извлеченного из почвенного массива с помощью пробоотборника, аккуратно выравнивали ножом и фиксировали в устройстве для определения технической частоты колебаний двумя болтами (рис.3.15, 3.16).

Установка [49, 60] для определения технической частоты колебаний включает металлическую подставку 1, шпильки 2, верхнюю пластину 5. В металлическую подставку 1 ввернуты две шпильки 2. Шпильки 2 служат направляющими для верхней пластины 5. На верхней пластине 5 размещается катушка 6. Подготовленный почвенный образец 4 фиксируется в кольце 3, которое в свою очередь размещено неподвижно на металлической подставке 1. На верхнем крае почвенного образца размещено опорное кольцо (на рисунке не показано), на котором в свою очередь расположен постоянный магнит 7. Постоянный магнит 7 входит в катушку 6 верхней пластины 5.

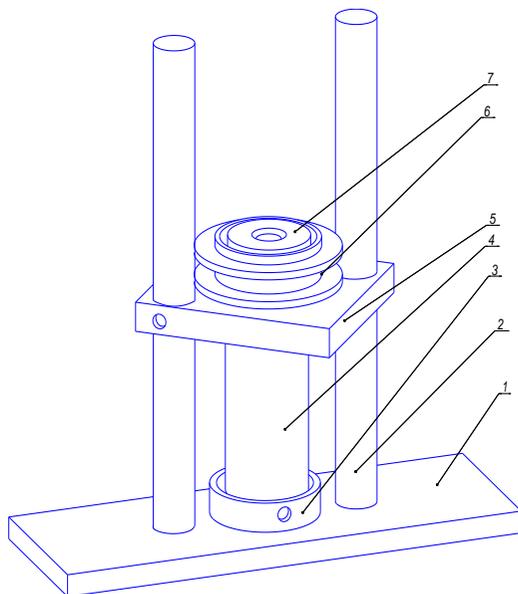


Рис. 3.15. Устройство для определения технической частоты колебаний



Рис. 3.16. Фиксация почвенного образца

Подключаем устройство для определения технической частоты колебаний к АЦП и к ноутбуку (рис. 3.17).



Рис. 3.17. Система измерений технической частоты в сборе

Для обработки и регистрации колебаний была разработана блок-схема программы в среде графического программирования Labview (рис. 3.18).

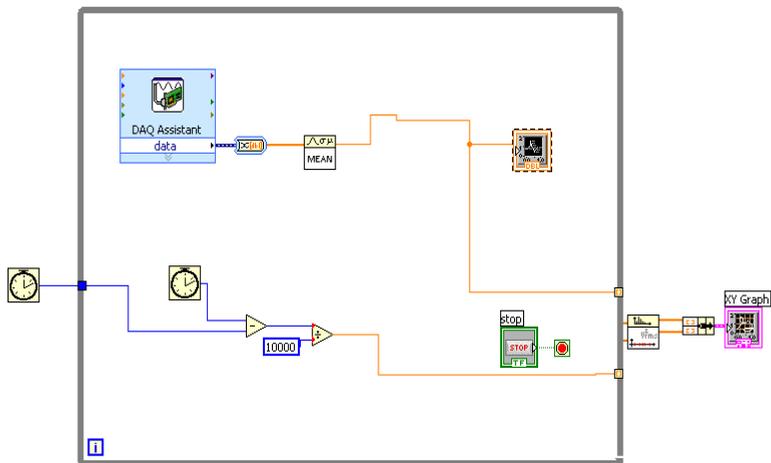


Рис. 3.18. Блок-схема программы измерений

При импульсном нагружении почвенный образец первоначально сжимается и, в дальнейшем, совершает затухающие колебания, приводящие к созданию ЭДС в катушке 6. Этот сигнал регистрируется АЦП

и выводится на экран компьютера, где на лицевой панели отображается кривая колебаний верхнего торца и выводится график соответствия амплитуды и частоты (рис. 3.19).

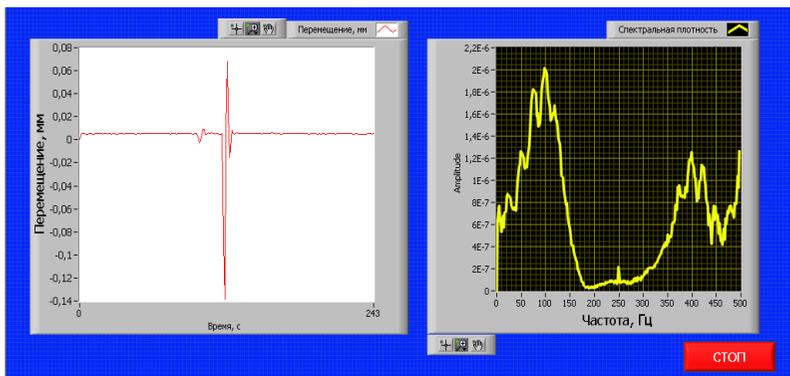


Рис. 3.19. Определение технической частоты колебаний

Определив частоту f , по выражению (2.22) определяем модуль упругости первого рода.

3.2.7 Методика определения коэффициента динамической вязкости почвы

Чрезвычайно большой разброс экспериментальных данных значений вязкости требует уточнения зависимости коэффициента динамической вязкости от абсолютной влажности с учетом гранулометрического состава, в частности для среднесуглинистой почвы.

Для проведения исследований использовалась установка Цытовича - Файнцимера (рис.3.20).

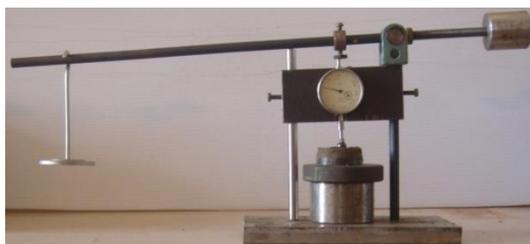


Рис. 3.20. Установка Цытовича - Файнцимера

Были использованы следующие фрагменты методики. Масса подвешиваемого груза должна быть такой, чтобы погружение шарика за 30 с составило $0,5d_{ш}$. Опыт повторялся на одном образце почвы. Кольцо с почвой перемещалось таким образом, чтобы центр следующего погружения находился на расстоянии $3d_{ш}$ от центра предыдущего погружения. Динамический коэффициент вязкости почвы определялся по формуле Стокса

$$\eta = \frac{d_{ш}^2}{18V_{co}}(\gamma_{э} + 0,15\gamma) \quad (3.11)$$

где V_{co} - скорость осадки;
 $\gamma_{э}$ - фиктивный удельный вес шарика;
 γ - удельный вес грунта.
 Скорость осадки

$$V_{co} = \frac{\Delta S}{\Delta t}, \quad (3.12)$$

где ΔS - осадка прямолинейного участка графика погружения.
 Фиктивный удельный вес шарика

$$\gamma_{э} = \frac{6(P_{ш} + P_{пг})}{\pi d_{ш}^3}, \quad (3.13)$$

где $P_{ш}$ - вес шарика;
 $P_{пг}$ - вес дополнительно подвешиваемого груза;
 $d_{ш}$ - диаметр шарика.

3.2.8 Методика определения коэффициента Пуассона

Основной целью исследований являлось определение коэффициента Пуассона для среднесуглинистой почвы при значениях абсолютной влажности 7,6%.

В почве, различной по гранулометрическому составу и влажности, наблюдается специфическая зависимость напряжений и деформаций, которая может быть представлена реологической моделью. Известны модели Гука, Ньютона, Максвелла, Фойгта, Пойнтинга - Томсона, Барджерса. В тоже время, при динамическом нагружении, почва ведет себя как малосжимаемое и условно упругое тело, характеризующееся модулем упругости I рода E и коэффициентом Пуассона μ .

Известна методика определения E и μ в условиях динамического нагружения малой интенсивности. Для почв при низких значениях абсолютной влажности коэффициент Пуассона можно определить и при статическом нагружении.

Был разработан стенд [70] (рис. 3.21) и компьютерная программа [56, 57, 59] для определения перемещения узловых точек почвенного массива.



Рис. 3.21. Стенд для определения перемещений

Стенд состоит из силовой и измерительной частей. В силовую часть входят механизмы нагружения и контроля нагрузки, поршень, опирающийся на роликовые опоры. Наличие роликовых опор, которые скользят по направляющим, позволяют поршню оказывать воздействие на пласт в вертикальной плоскости. Измерительная часть представлена оптическими датчиками, размещенными на панели. В качестве оптических датчиков используются компьютерные мыши с высокой степенью разрешения, которые фиксируют перемещения ряда узловых точек. В свою очередь панель крепится к подвижной боковине, которая шарнирно связана с корпусом силовой части.

Программа состоит из нескольких файлов. Первый файл - драйвер, который размещен поверх стандартного драйвера устройства и служит непосредственно перехватчиком и разделителем всех манипуляторов. Второй файл - программа, которая обрабатывает данные о перемещении точек и их записывает. Принцип действия компьютерной программы основан на перехвате данных о движении точек напрямую

с драйвера устройства. Это позволяет получить максимально точные показания, независимые от разрешения экрана и текущих настроек манипулятора в системе. В общей сложности в программе «Excel» могут записываться данные от 32 датчиков [54].

Для того чтобы установить программу необходимо выполнить ряд действий:

1. Подключить все манипуляторы и дождаться времени установки на них своих драйверов;
2. Зайти в диспетчер устройств и скопировать ID номер оборудования;
3. Открыть с помощью блокнота файл cpnmouse.inf и под точкой [CPNGroup.Mfg] после %CPNGroup.DeviceDesc1% = usbinst вставить ID номер. Это необходимо сделать для каждого устройства;
4. Удалить старые драйвера манипуляторов и установить новые. Для этого необходимо при установке выбрать файл cpnmouse.inf.;
5. Скопировать файлы с программой на компьютер;
6. Запустить файл MouseLogger.exe;
7. Программа начинает записывать данные при любом движении одного из манипуляторов.

Для определения микроперемещений по данным, которые регистрирует программа, необходимо выяснить оптическое разрешение манипулятора и цену деления контроллера.

Внешний вид программы представлен на рисунке 3.22.

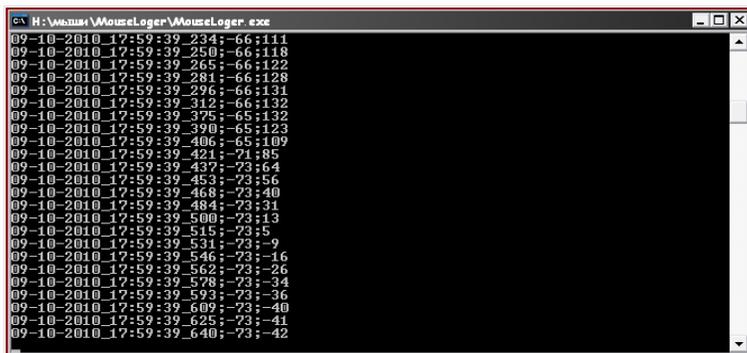


Рис. 3.22. Внешний вид программы

Запуском файла MouseLogger.exe начинаем выполнять измерения. Регистрация и запись происходит при любом перемещении одного из манипуляторов. После измерений в папке с программой появится файл с именем,

отражающим текущую дату. Открыв его с помощью Microsoft Office Excel, можем выполнять все необходимые действия с данными. Умножим результаты измерений на цену деления, получим действительные перемещения искомым точек по двум координатным осям.

Таким образом, компьютерная программа переводит аналоговые сигналы, поступающие от датчиков, в качестве которых использованы компьютерные мыши, в числовые массивы с последующей их записью на жестком диске компьютера с целью дальнейшей обработки с помощью статистических пакетов.

Для проведения исследований подготавливается почвенный параллелепипед определенной размера ненарушенной структуры (рис. 3.23).



Рис. 3.23. Почвенный параллелепипед

Размещают стенд, предварительно открыв подвижную боковину. Зафиксировав между собой обе боковины, проделывают в почвенном массиве 4 сквозные отверстия, в которых размещаются стальные стержни с наклеенными на боковой поверхности фрагментами коврика компьютерной мыши.

Коэффициент Пуассона определяется (рис.3.24) с помощью выражения 3.14.

$$\mu = \frac{v_i}{u_i}, \quad (3.14)$$

где v_i - перемещение узловой точки по вертикали;
 u_i - перемещение узловой точки по горизонтали.

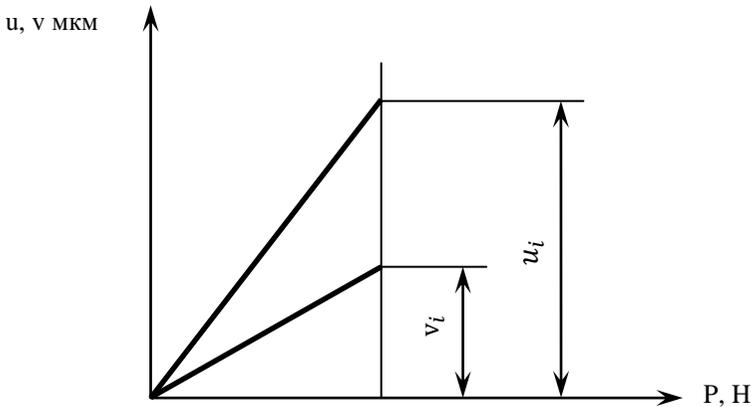


Рис. 3.24. К определению коэффициента Пуассона

3.2.9 Методика определения критической высоты разрушения почвенных частиц

В процессе воздействия рабочего органа на почву, в ней, как в объекте обработки, накапливается потенциальная энергия. Существуют различные теории прочности, в которых величина допускаемых напряжений должны быть меньше различной комбинации главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. В тоже время английский ученым А. Гриффитсом предложена теория [16], где начало трещинообразования связано с накопленной потенциальной энергией тела.

Рассмотрим следующую схему (рис.3.25). Частица почвы, отпущенная с высоты h , падает на металлическую поверхность. От удара частица почвы разрушается. В момент падения на частицу действует только ускорение свободного падения.

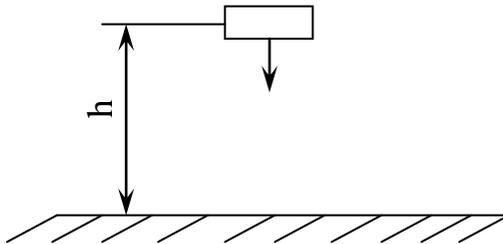


Рис. 3.25. Падение почвенного образца

Скорость падения

$$V = g \times t, \quad (3.15)$$

где t – время падения;

g – ускорение свободного падения.

Расстояние, пройденное телом за время падения, будет равно

$$h = \int g \times t \times dt. \quad (3.16)$$

$$h = \frac{g \times t^2}{2}. \quad (3.17)$$

Время падения

$$t = \sqrt{\frac{2 \times h}{g}}. \quad (3.18)$$

Скорость, с которой комок почвы соударяется с металлической поверхностью, равна

$$V = \sqrt{2hg}. \quad (3.19)$$

А кинетическая энергия падающего тела

$$U = m \times g \times h. \quad (3.20)$$

Известна также объемная (массовая) теория разрушения твердых тел, разработанная русским ученым В.Л. Кирпичевым и немецким профессором Ф. Киком, где величина работы дробления прямо пропорциональна объему или массе тела. С учетом этого, при исключении массы тела, получим в конечном итоге величину удельной потенциальной энергии, соответствующую началу разрушения почвенного образца в момент его падения.

$$u = \rho \times g \times h. \quad (3.21)$$

То есть, экспериментально определив высоту падения, соответствующую началу разрушения почвенного образца, можно определить величину удельной потенциальной энергии.

Геометрические параметры образцов следующие: $d=5\text{см}$; $h=5\text{см}$. Образец разрушался при ударе о металлическую поверхность (рис. 3.26). Опыт проводился в пятикратной повторности.



Рис. 3.26. К определению высоты падения разрушения

3.2.10 Методика определения коэффициента рыхления

Нами были проведены опыты по определению зависимости коэффициента рыхления от величины накопленной потенциальной энергии разрушения почвенных образцов.

Почвенный образец $d=5\text{см}$ и $h=5\text{см}$ первоначально взвешивался, а затем при фиксированной высоте падения при ударе о металлическую поверхность разрушался (рис.3.27).



Рис. 3.27. Разрушение почвенного образца

Высота падения изменялась в интервале 90...120 см с шагом 10 см. С помощью решет отделялись частицы почвы с размерами 0...10 мм, 10...20 мм, 20...50 мм и взвешивались.

Коэффициент рыхления, характеризующий содержание почвенных частиц размером 0...10 мм, определяется по выражению (2.31).

4. Результаты экспериментальных исследований

4.1. Результаты исследования твердости и влажности суглинистой почвы в условиях засушливого лета 2010 года

На территории УОХ «Кокино» Выгоничского района Брянской области в течение лета 2010 года в междурядье плодовых насаждений исследовалась твердость и влажность почвы. Фон - серая лесная, мехсостав - суглинистая. Показатели определялись с учетом общепринятых методик. Были получены следующие результаты.

Среднее значение твердости почвы в июне 2010 года находилось в пределах 4,96 - 5,26 МПа. Максимальной твердостью обладала почва во второй декаде месяца. Среднее значение влажности почвы в этом же месяце находилась в пределах 12,20-13,46%. Максимальная влажность, составляющая 13,46%, была в первой декаде июня. Значению максимальной влажности почвы в первой декаде соответствует значение минимальной твердости исследуемой почвы (рис.4.1, 4.2).

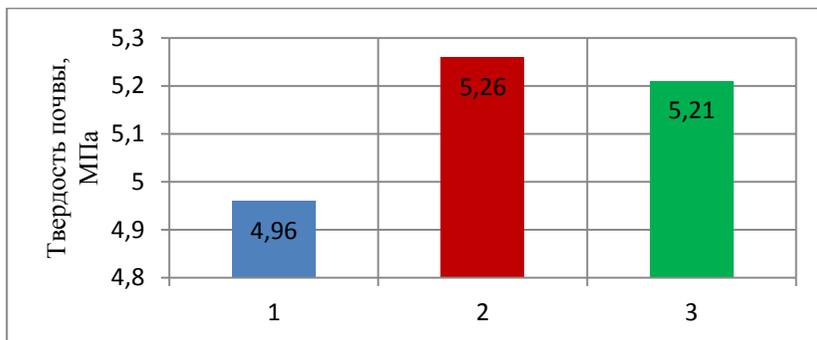


Рис. 4.1. Изменение твердости почвы в июне

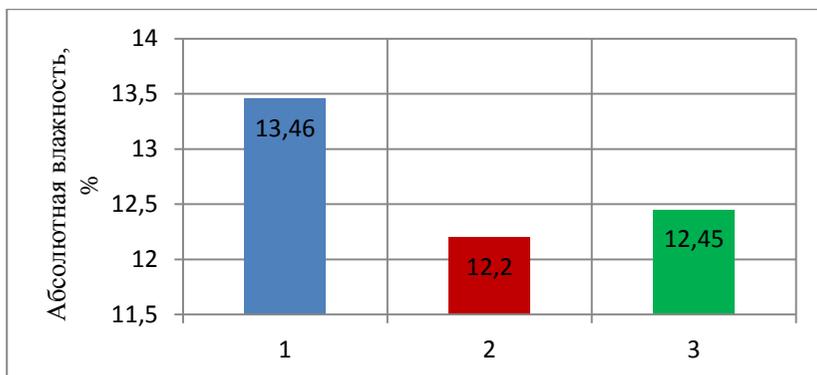


Рис. 4.2. Изменение абсолютной влажности почвы в июне

Среднее значение твердости почвы в июле 2010 года находилось в пределах 4,27-5,76 МПа [55] (рис.4.3). Максимальное значение твердости 5,76 МПа соответствует 3 декаде июля. Минимальное значение твердости соответствует 2 декаде. Данное минимальное значение твердости почвы соответствует максимальному значению влажности, которое во второй декаде составило 16,34%. Минимальное значение влажности, равное 9,98%, соответствует максимальному значению твердости для третьей декады июля (рис.4.3, 4.4).

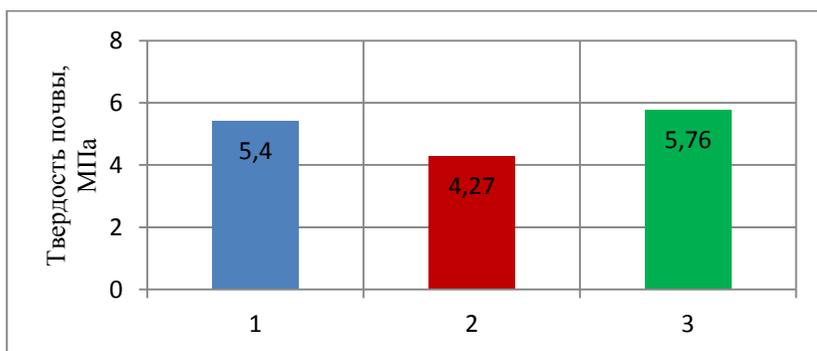


Рис. 4.3. Изменение твердости почвы в июле

Твердость почвы в августе колебалась в пределах 4,92-5,46 МПа, а абсолютная влажность -11,21-13,65%. Максимальная твердость 5,46 МПа при минимальной влажности 11,21% соответствует 2 декаде августа. Минимальная твердость 4,92МПа при максимальной влажности 13,65% соответствует 1 декаде августа (рис.4.5, 4.6).

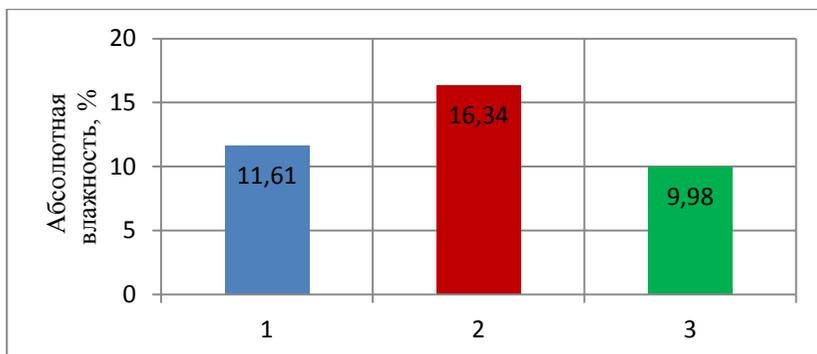


Рис. 4.4. Изменение абсолютной влажности почвы в июле

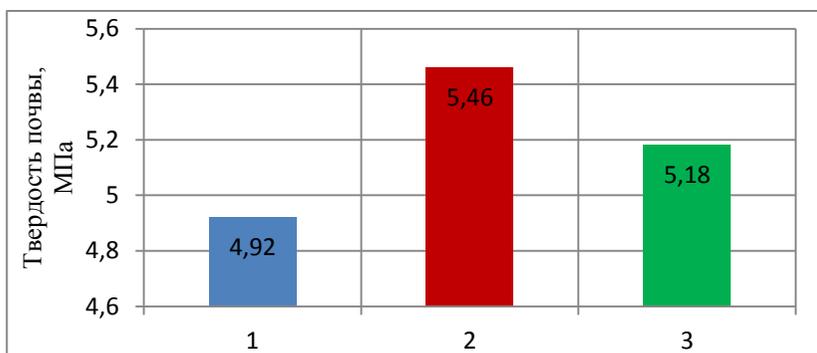


Рис. 4.5. Изменение твердости почвы в августе

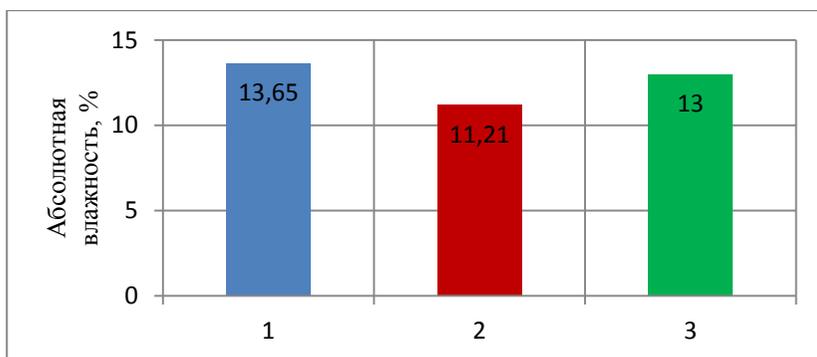


Рис. 4.6. Изменение абсолютной влажности почвы в августе

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Абсолютная влажность среднесуглинистой почвы в течение лета 2010 года колебалась в пределах 9,98% - 17%. Среднее значение абсолютной влажности за сезон составило 12,71%. Твердость исследуемой суглинистой почвы летом 2010 года колебалась в пределах 4,2-5,8 МПа. Среднее значение твердости за сезон составило 5,12 МПа.

2. На основании анализа результатов экспериментальных исследований при степени достоверности аппроксимации $R^2 = 0,95$ получено следующее уравнение регрессии

$$P = -0,23 \times \omega_a + 8,07. \quad (4.1)$$

4.2 Угол внешнего трения почвы

Почвенные образцы извлекались с помощью пробоотборника из междурядья сада УОХ «Кокино» Выгоничского района Брянской области. Фон - серая лесная. Мехсостав - суглинистая.

По результатам исследований была получена следующая графическая зависимость угла внешнего трения от влажности и уравнение регрессии при степени достоверной аппроксимации $R^2=0,698$ [69].

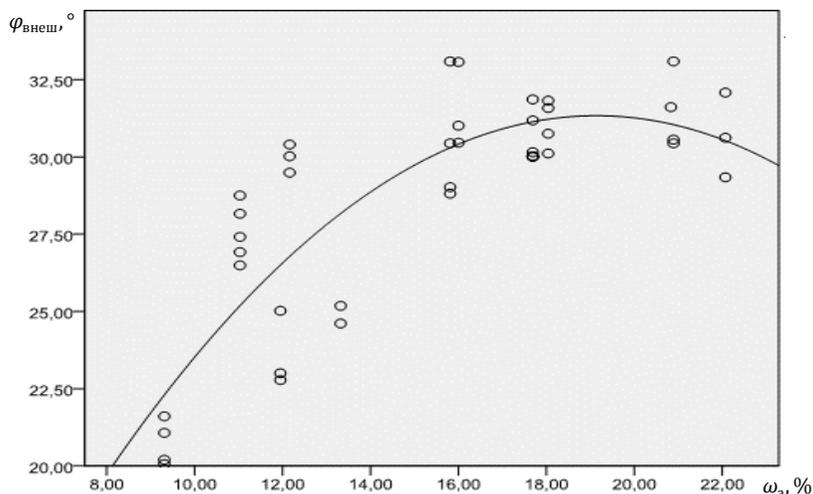


Рис. 4.7. Зависимость угла внешнего трения среднесуглинистой почвы от влажности

$$\varphi_{внеш} = 3,581 \times \omega_a - 0,094 \times \omega_a^2 - 2,935. \quad (4.2)$$

Угол внешнего трения почвы в зависимости от значения абсолютной влажности в диапазоне 10...22% изменяется по параболической зависимости. Максимальное значение угол внешнего трения принимает при влажности 18%. Последующее увеличение до 23% приводит к снижению данного показателя.

4.3 Угол внутреннего трения почвы

Угол внутреннего трения суглинистой почвы исследовался при изменении абсолютной влажности суглинистой почвы от 9,31% до 22,07%. Результаты исследования представлены в виде графика на рисунке 4.8.



Рис. 4.8. Зависимость значений угла внутреннего трения от абсолютной влажности среднесуглинистой почвы

Угол внутреннего трения среднесуглинистой почвы в интервале значений абсолютной влажности 9,31%...22,04% составляет 48° ... 29°. Отмечается тенденция уменьшения исследуемого параметра с увеличением значения абсолютной влажности. В интервалах влажности 9,31...11,03% величина угла внутреннего трения была постоянной и составила 48°. В интервале влажности 20,84...22,07 величина угла внутреннего трения была также постоянной и составляла 29°. Имеется характерный пик при влажности 18,04%.

4.4 Предел прочности почвы на растяжение

С целью уточнения влияния значений абсолютной влажности суглинистой почвы на предел прочности почвы при растяжении в УОХ «Кокино» Брянской ГСХА в 2012 году были проведены соответствующие экспериментальные исследования. Фон почвы - серая лесная, мехсостав - суглинистая. Были получены следующие результаты (рис.4.9) [65].

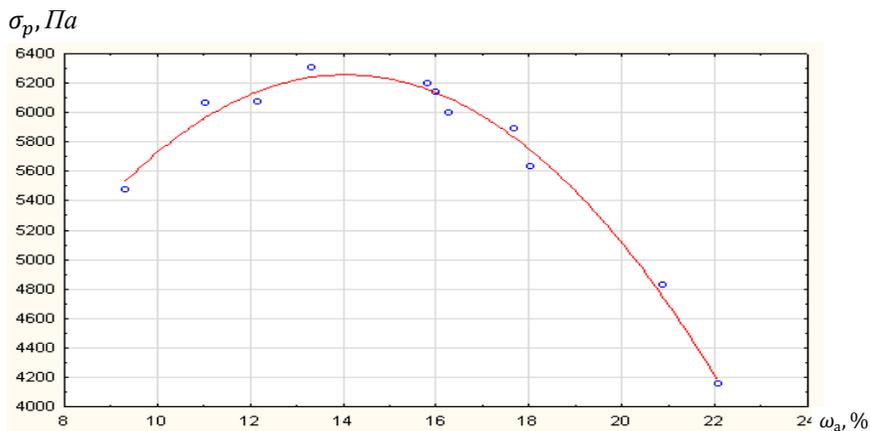


Рис. 4.9. Зависимость предела прочности почвы на растяжение от абсолютной влажности

Уравнение регрессии при степени достоверности аппроксимации $R^2 = 0,967$ представлено ниже

$$\sigma_p = -113,12 + 907,013 \times \omega_a - 32,29 \times \omega_a^2. \quad (4.3)$$

Абсолютная влажность суглинистой почвы находилась в пределах 9 - 22%. При влажности 14% предел прочности почвы на растяжение принимает максимальное значение. Последующее увеличение или уменьшение значения абсолютной влажности приводит к уменьшению значений исследуемого показателя.

На основании изложенного, можно сделать следующий вывод. Абсолютная влажность суглинистой почвы в пределах 14% является тем пороговым значением, которому соответствует максимальная упругость межагрегатных связей частиц.

4.5 Предел прочности почвы на сжатие. Упругая составляющая относительной деформации сжатия

Для определения зависимости предела прочности суглинистой почвы на сжатие и упругой составляющей относительной деформации от значений абсолютной влажности суглинистой почвы в лаборатории кафедры механики и основ конструирования в 2011 году были соответствующие эксперименты. Фон почвы - серая лесная, мехсостав - суглинистая. Были получены следующие результаты.

Уравнение регрессии предела прочности суглинистой почвы на сжатие от значений абсолютной влажности при степени достоверности аппроксимации $R^2 = 0,938$ [52]

$$\sigma_B = -0,003\omega_a^2 + 0,0015\omega_a + 0,252. \quad (4.4)$$

График зависимости упругой составляющей относительной деформации от значений абсолютной влажности представлен на рисунке 4.10.

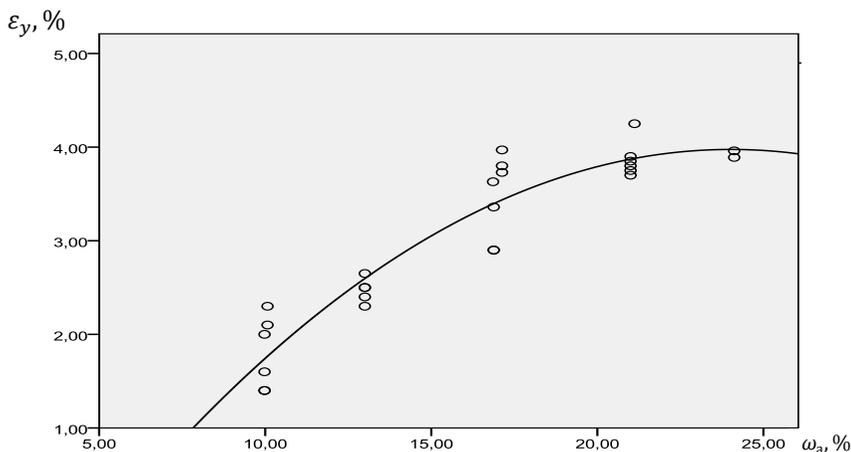


Рис. 4.10. Зависимость упругой составляющей относительной деформации почвы при сжатии

Уравнение регрессии при степени достоверности аппроксимации $R^2 = 0,895$ представлено ниже

$$\varepsilon_y = -0,11 \times \omega_a^2 + 0,545 \times \omega_a - 2,573. \quad (4.5)$$

Анализ показал, что с увеличением значений абсолютной влажности величина упругой составляющей возрастает, принимая максимальное значение при $\omega_a = 24\%$.

4.6 Модуль упругости первого рода

При проведении испытаний определялась твердость и влажность почвы. Фон - серая лесная, мехсостав - суглинок. Взятие проб сопровождалось трехкратным определением влажности почвы. Исследование образцов проводилось при следующем условии: $l \geq 2,5d$.

Было получено уравнение регрессии при степени достоверности аппроксимации, равной $R^2 = 0,964$ [50].

$$E = -47998,895\omega_a^2 + 1520917,783\omega_a - 7734389,949. \quad (4.6)$$

При влажности почвы в пределах 9,59% - 20,29% значения модуля упругости находились в диапазоне 2МПа - 4МПа. Минимальное значение модуля упругости получено при абсолютной влажности 9,59%, а максимальное значение - 15,09%. Отмечается тенденция увеличения модуля упругости в диапазоне изменения влажности от 9,59 до 15,09%. Отмечается тенденция убывания значения модуля упругости в диапазоне изменения влажности от 15,09% до 20,29%.

Тенденцию повышения модуля упругости почвы с увеличением влажности почвы в данном интервале мы связываем с преобладающей ролью плотносвязанной и рыхлосвязанной воды, которая повышает упругость межагрегатных связей.

4.7 Коэффициент динамической вязкости почвы

В результате экспериментальных исследований однозначно установлено (рис.4.11), что с увеличением абсолютной влажности средне-суглинистой почвы с 10% до 26% значения коэффициента динамической вязкости падает [64].

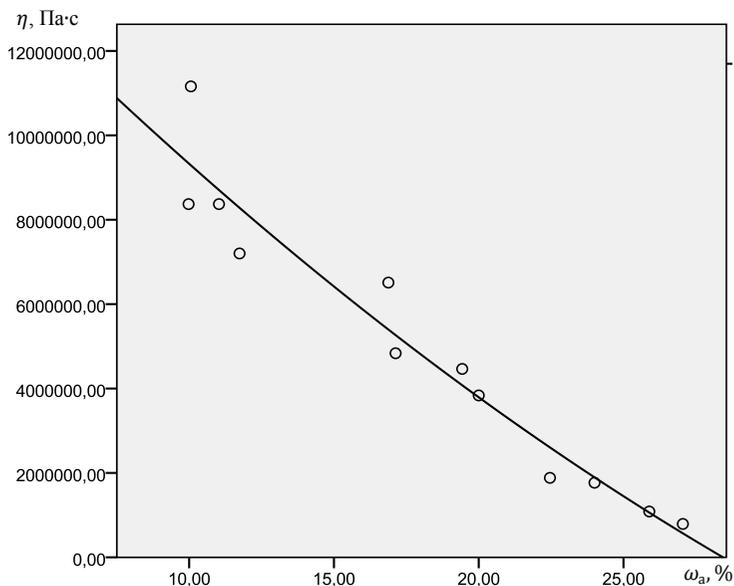


Рис. 4.11. График зависимости коэффициента динамической вязкости среднесуглинистой почвы от абсолютной влажности

При абсолютной влажности 10% максимальное значение исследуемого показателя составило 12×10^6 Па·с. При 25% абсолютной влажности минимальное значение составило 2×10^6 Па·с. Корреляционное соотношение коэффициента динамической вязкости и абсолютной влажности среднесуглинистой почвы при степени достоверности аппроксимации $R^2 = 0,936$ имеет следующий вид

$$\eta = 5627,569 \times \omega_a^2 - 722124,877 \times \omega_a + 1,598 \times 10^7. \quad \dots (4.7)$$

Таким образом, полученные значения коэффициента динамической вязкости попадают в интервал полученных ранее экспериментальных значений, приближаясь к ранее указанному минимальному значению.

4.8 Коэффициент Пуассона

Опыты проводились в междурядье плодовых насаждений на территории учебно - опытного хозяйства «Кокино» Выгониского района Брянской области. Фон почвы - серая лесная, мехсостав - суглинистая. Абсолютная влажность почвы при проведении опытов в условиях засушливого лета 2010 года составила 7,6%. Значения перемещений 4 узловых точек по вертикали и горизонтали представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Результаты перемещений узловых точек

2 узловая точка	5 узловая точка	7 узловая точка	9 узловая точка
$v_2 = 150$ мкм	$v_5 = 100$ мкм	$v_7 = 75$ мкм	$v_9 = 50$ мкм
$u_2 = 350$ мкм	$u_5 = 275$ мкм	$u_7 = 225$ мкм	$u_9 = 200$ мкм
$\mu_2 = 0,42$	$\mu_5 = 0,36$	$\mu_7 = 0,33$	$\mu_9 = 0,25$

Абсолютные величины перемещений по горизонтали больше чем по вертикали. С удалением от 1 и 3 узловой точки перемещения исследуемых точек по вертикали и по горизонтали уменьшаются. Это все соответствует условиям закрепления и нагружения пласта [63].

Принимая во внимание наличие линейных зависимостей перемещений по вертикали и горизонтали всех узловых точек, среднее значение коэффициента Пуассона для среднесуглинистой почвы при влажности 7,6% составило $\mu = 0,34$. При абсолютной влажности 7,6% суглинистая почвы является квазиупругой средой.

4.9 Критическая высота разрушения почвенных частиц

Результаты исследований представлены на рис. 4.12. Также было получено уравнение регрессии при степени достоверности аппроксимации, равной $R^2 = 0,72$.

На данном графике отчетливо прослеживается тенденция связи высоты разрушения с абсолютной влажностью почвы. Крайне левая и крайне правые области указывают на тенденцию увеличения высоты падения, связанную с началом разрушения. Так, при влажности почвы в пределах 10% высота падения, соответствующая началу разрушения в сред-

нем составляет 60-70 см. Данный фактор мы связываем с увеличением сил сцепления между почвенными агрегатами.

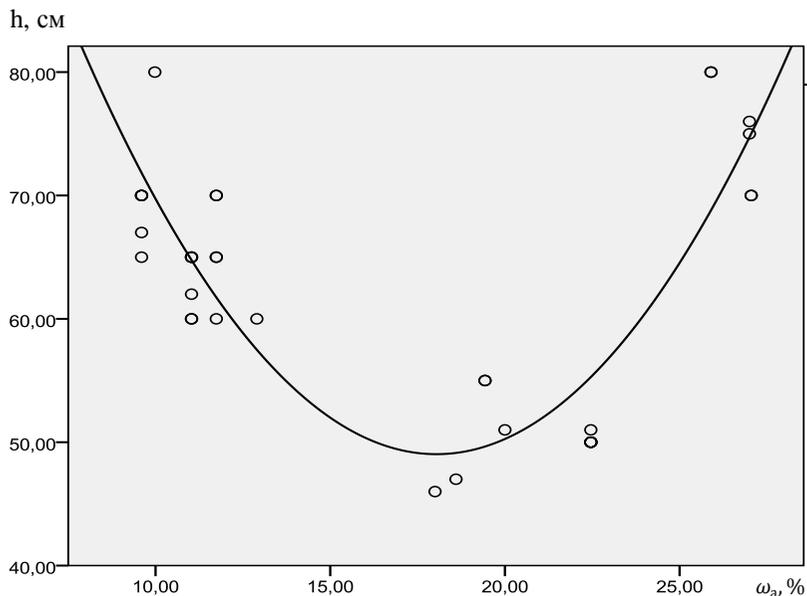


Рис. 4.12. Высота разрушения почвенных частиц

При абсолютной влажности почвы выше 25%, высота, соответствующая высоте разрушения, находилась в пределах 70-80 см. Данные обстоятельства мы связываем с наличием влаги, которая играет роль амортизирующей подушки, приводящей более к искажению формы частиц, чем к нарушению связи между ними.

Высота падения, соответствующая центральной области графика при абсолютной влажности 17...22%, минимальна и составляет 45-55 см. Это напрямую связано с понятием “физической спелости” почвы, при которой затраты на обработку минимальны. Величина удельной потенциальной энергии при этом составляет 7622 Па. Уравнение регрессии при полученном показателе достоверной аппроксимации имеет вид

$$h = 0,32 \times \omega_a^2 - 11,549 \times \omega_a + 153. \quad (4.8)$$

4.10 Коэффициент рыхления

Коэффициент рыхления определялся при абсолютной влажности среднесуглинистой почвы 17,69%, 18,04%, 22,07% [66]. При абсолютной влажности 17,69% (рис.4.13) в пределах изменения удельной потенциальной энергии 13720Па...18293Па коэффициент рыхления изменяется в интервале 21,32%...29,82%. При повышении значения удельной потенциальной энергии от минимального значения 13720Па до 16769Па наблюдается тенденция увеличения исследуемого показателя. Максимальное значение коэффициент рыхления принимает тогда, когда значение удельной потенциальной энергии составляет 16769Па. Дальнейшее увеличение значения удельной потенциальной энергии приводит к снижению данного показателя.



Рис. 4.13. Зависимость коэффициента рыхления от удельной потенциальной энергии при влажности 17,69%

При абсолютной влажности 18,04% (рис.4.14) в пределах изменения удельной потенциальной энергии 13720Па...18293Па коэффициент рыхления изменяется в интервале 23,39%...34,84%. Также при повышении значения удельной потенциальной энергии от минимального значения 13720Па до 16769Па наблюдается тенденция увеличения исследуемого показателя. Максимальное значение коэффициента рыхления составило 34,84%. Дальнейшее увеличение значения удельной потенциальной энергии приводит к снижению данного показателя.

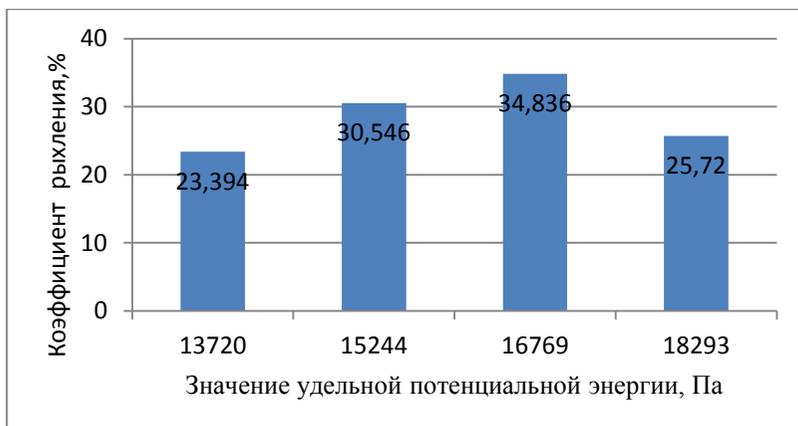


Рис. 4.14. Зависимость коэффициент рыхления от удельной потенциальной энергии при влажности 18,04%

При абсолютной влажности 22,07% (рис. 4.15) в пределах изменения удельной потенциальной энергии 13720Па...18293Па коэффициент рыхления изменяется в интервале 20,71%...28,69%. Также при повышении значения удельной потенциальной энергии от минимального значения 13720Па до 16769Па наблюдается тенденция увеличения исследуемого показателя. Максимальное значение коэффициента рыхления составило 28,69%. Дальнейшее увеличение значения удельной потенциальной энергии приводит к снижению данного показателя.



Рис. 4.15. Зависимость коэффициента рыхления от удельной потенциальной энергии при влажности 22,07%

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Пороговое значение удельной потенциальной энергии, при котором только возможно крошение, зависит от значения абсолютной влажности суглинистой почвы. Для суглинистой почвы, находящейся в состоянии физической спелости, оно составит 7622Па.

2. Повышение значения удельной потенциальной энергии до 16769Па в диапазоне значений абсолютной влажности 17,69%...22,07% однозначно приводит к повышению коэффициента рыхления.

3. Последующее увеличение значения накопленной удельной потенциальной энергии нецелесообразно, так приводит к снижению коэффициента рыхления.

Заключение

1. Получены уравнения регрессии величин твердости, угла внешнего трения, модуля упругости первого рода, позволяющие использовать для оценки результатов теоретических и экспериментальных исследований выражения В.П. Горячкина, Н.В. Щучкина, Г.Н.Синеокова, В.В. Кацыгина.

2. Получены уравнения регрессии величин коэффициента динамической вязкости, предела прочности почвы на растяжение и сжатие, зависимость угла внутреннего трения от значения абсолютной влажности. Для влажности устойчивого завядания определен коэффициент Пуассона. Данные параметры позволяют определить тяговое усилие лезвия лемеха.

3. Определена высота падения почвенных частиц, соответствующая высоте разрушения в зависимости от величины абсолютной влажности суглинистой почвы. Данный параметр позволяет определить тяговое усилие поверхности лемеха, рассчитать допустимую величину нормальных и касательных напряжений.

4. Получено уравнение регрессии, связывающее величину упругой составляющей относительной деформации сжатия суглинистой почвы от значений абсолютной влажности. Данный параметр позволяет определить целесообразный угол отбортовки лезвия лемеха.

5 Определена зависимость величины коэффициента рыхления суглинистой почвы, находящейся в состоянии физической спелости, от накопленной удельной потенциальной энергии.

Список литературы

1. Амарян, Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов [Текст] / Л.С. Амарян.-М.: Недра, 1969.-192 с.
2. Атрошенко, М.Д. Основы агрономии [Текст] / М.Д. Атрошенко, Н.Д. Ковалев, А.В. Солошенко и др.-М.: Колос, 1978.- 30 с.
3. Бабков, В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов [Текст] / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. - М.: Высшая школа, 1986. – 119 с.
4. Болдырев, Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса [Текст] / Г.Г. Болдырев // Монография. - Пенза: ПГУАС, 2008.-15 с.
5. Бойков, В.П. Шины для тракторов и сельскохозяйственных машин [Текст] / В.П. Бойков, В.Н. Белковский. - М.: ВО «Агропромиздат», 1988. - 98 с.
6. Вадюнина, А.Ф. Методы исследования физических свойств почвы [Текст] / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина. - М.: Агропромиздат, 1986.-144 с.
7. Виноградов, В.И. Влияние скорости нагружения на величину временного сопротивления почвы [Текст] / В.И. Виноградов, Г.А Семенов // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов. Труды. Выпуск 33. Челябинск.-1970.- 53 с.
8. Воробьев, С.А. Практикум по земледелию [Текст] / С.А. Воробьев, В.Е. Егоров, А.Н. Киселев. - М.: Издательство «Колос», 1971. – 83 с.
9. Воронюк, Б.А. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений [Текст] / Б.А. Воронюк, А.И. Пьянков, Л.В. Мильцева, М.Ф. Бурмистрова, И.К.Макарец, Е.В. Белова, А.Ф. Соколов, Н.В. Клемм и др.-М.: Издательство «Колос», 1970.- 393 с.
10. Герсеванов, Н.М. Исследования в области динамики грунтовой массы, механики и прикладной математики [Текст] / Н.М. Герсеванов // Соб.сочинений, Т.2. - М.: Стройвоен Мориздат, 1948. - 253 с.
11. Гольдштейн, М.И. Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] / М.И. Гольдштейн, А.А. Царьков, И.И. Черкасов. - М.: Транспорт, 1981. – 57 с.
12. Горячкин, В.П. Собрание сочинений в 3-х томах. Том первый [Текст] / В.П. Горячкин. - М.: Издательство «Колос»,1965. – 229 с.
13. Дарков, А.В. Сопротивление материалов [Текст] / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. - М.: Высшая школа, 1965. - 111 с.
14. Джобинашвили, Н.И. Разработка технологии и использование технологических средств для межствольной обработки почвы в многолетних насаждениях [Текст] / Н.И. Джобинашвили // Автор. дис. канд.

с/х наук. - Тбилиси, 1978. – 23 с.

15. Емельянов, А.М. Гусеничные уборочные машины [Текст] / А.М. Емельянов, И.В. Бумбар, М.В. Канделя и др. - Благовещенск: Издательство ДальГАУ, 2007. – 25 с.

16. Зайцев, Ю.В. Механика разрушения для строителей [Текст] / Ю.В. Зайцев. - М.: Высшая школа, 1991.-9 с.

17. Зеленин, А.Н. Лабораторный практикум по резанию грунтов [Текст] / А.Н. Зеленин, Г.Н. Карасев, Л.В. Красильников. - М.: Издательство «Высшая школа», 1969. – 58 с.

18. Зеленин, А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами [Текст] / А.Н. Зеленин. - М.: Машиностроение, 1968. - 53 с.

19. Золотаревская, Д.И. Математическое моделирование и расчет уплотнения почвы в результате динамических нагрузок [Текст] / Д.И. Золотаревская // Почвоведение. - 2011. - №4. - с. 27.

20. Золотаревская, Д.И. Изменение реологических свойств и плотности дерново-подзолистой почвы при динамических нагрузках [Текст] / Д.И. Золотаревская // Почвоведение. - 2010. - №3 - с. 31.

21. Казаков, В.С. Глубокое объемное рыхление переуплотненных почв [Текст] / В.С. Казаков, Бекишев В.Т., Д.Сабо, Ф. Кайфаш // Техника в сельском хозяйстве. - 1997. - №1 - с. 17

22. Карпенко, А.Н. Сельскохозяйственные машины [Текст] / А.Н. Карпенко, В.М. Халанский. - М.:Агропромиздат, 1989. -7 с.

23. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины [Текст] / Н.И. Кленин, В.А. Сакун. - М.: Колос, 1994. -103 с.

24. Ксенович, И.П. Ходовая система - почва - урожай [Текст] / И.П. Ксенович, В.А. Скотников, М.И. Ляско. - М.: Агропромиздат, 1995. - 98 с.

25. Кочетов, В.Т. Соппротивление материалов [Текст] / В.Т. Кочетов . - Ростов на Дону: Издательство Ростовского Университета, 1987. – 40 с.

26. Ксенович, И.П. Сельскохозяйственные машины и оборудование [Текст] / И.П. Ксенович, М.М. Фирсов, Г.П. Варламов и др. // Энциклопедия. - М.: Машиностроение, 1998. - с.121.

27. Кудрявец, В.П. Продуктивность яблони [Текст] / В.П. Кудрявец. - М.: Агропромиздат, 1987. - 93 с.

28. Кулен, А. Современная земледельческая механика [Текст] / А. Кулен, Х. Куиперс. - М.: Агропромиздат, 1986. - 44 с.

29. Кушнарв, А.С. К методике определения модулей упругости и сдвига почвы [Текст] / А.С. Кушнарв // Сборник научных трудов молодых ученых Мелитопольского института механизации сельского

хозяйства. - Мелитополь, 1968. – 3 с.

30. Кусов Т.Т. Исследование разрушения почвенных комков катками [Текст] / Т.Т. Кусов // Тракторы и сельхозмашины. - 1959. - №8-с. 22.

31. Листопад, Г.Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины [Текст] / Г.Е. Листопад, Г.К. Демидов, Б.Д. Зонов и др. - М.: Агропромиздат, 1986. - 430 с.

32. Макарец, И.К. Степень крошения почвы при обработке [Текст] / И.К. Макарец // Земледелие. -1985. - №5 - с. 23-24.

33. Максимов, Б.И. Разрушаемость почвенных комков баллонами – комкодавителями [Текст] / Б.И. Максимов, Н.В. Юлдашев // Механизация и электрофикация сельского хозяйства. - 1971. - №10 - с. 17.

34. Мельников, С.В. Измельчение зерна на молотковых дробилках [Текст] / С.В. Мельников // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1973. - №9 - с.7.

35. Мельников, С.В. Механизация животноводческих ферм [Текст] / С.В. Мельников, П.В. Андреев, В.Ф. Базенков. - М.: Колос, 1969. – 36 с.

36. Миронов В.А., Галкин Н.Н. Определение физико-механических свойств грунтов при проектировании оснований зданий и сооружений / Пособие к лабораторным работам [Текст]. - Тверь, Из-во Тверского государственного технического университета, 2006. - с. 31.

37. Молотников, В.Я. Курс сопротивления материалов: Учебное пособие [Текст] / В.Я. Молотников. - СПб.: Издательство «Лань», 2006.-с. 27.

38. Орнатский, Н.В. Механика грунтов [Текст] / Н.В. Орнатский.- Издательство «Московский Университет», 1962. – 235 с.

39. Осадчий, А.П. Механика скалывания и излома почвенного пласта клином [Текст] / А.П. Осадчий / Автореферат дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук.-Волгоград, 1970. – 3 с.

40. Панов, И.М. Вопросы развития теории разрушения почвы [Текст] / И.М.Панов //Тракторы и сельскохозяйственные машины.- 1998 . - №11 - с. 18-20.

41.Панов, И.М. Исследование работы комбинированного плужного корпуса [Текст] / И.М. Панов, В.А. Шмонин // Тракторы и сельхозмашины. – 1969. - №8 – с. 29.

42. Пихачев, Г.В. Подземная гидравлика [Текст] / Г.В. Пихачев, Р.Г. Исаев.- М.: Недра, 1972.- 36 с.

43. Побскребко, М.Д. Теоретические основы выбора начальных параметров лемеха в соответствии с механическими свойствами почвы [Текст] / М.Д. Подскребко // Почвообрабатывающие машины и дина-

мика агрегатов. Труды. Выпуск 33. Челябинск.-1970.-с. 66.

44. Саакян, Д.Н. Система показателей комплексной оценки мобильных машин [Текст] / Д.Н. Саакян . - М.: Агропромиздат, 1988.-144 с.

45. Сабликов, М.В. Сельскохозяйственные машины-Ч.2. Основы теории и технологического расчета [Текст]/ М.В. Сабликов.- М.: «Колос», 1968. -38 с.

46. Сегеда, И.В. Обоснование выбора рабочих органов культиватора с учетом физико-механических свойств почвы и агротехнических требований [Текст] / И.В. Сегеда, Н.В. Колесников, М.Я. Миргород // Теоретические вопросы обработки почвы. Выпуск 2. Доклады на Всесоюзном научно-техническом совещании 17-21 декабря 1968 года. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство. - 1969. - с. 397.

47. Синеоков, Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин [Текст] / Г.Н. Синеоков, И.М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 54 с.

48. СП 22.13330 «Основания зданий и сооружений» [Текст], 2011.

49. Старовойтов, С.И. К оценке условий нагружения почвенного образца / С.И.Старовойтов, В.Н. Блохин, Е.С. Старовойтова, Н.Н. Чемисов [Текст] // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. Сборник научных работ. - Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2010.-с. 126.

50. Старовойтов, С.И. К определению модуля упругости первого рода [Текст] / С.И.Старовойтов, Н.Н. Чемисов // Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина.- 2011. - №1 - с. 39-40.

51. Старовойтов, С.И. О выборе идеальной модели почвы [Текст] / С.И. Старовойтов, В.Н. Блохин, Н.Н. Чемисов // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. Сборник научных работ. - Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2011.-с. 61.

52. Старовойтов, С.И. К определению предела прочности средне-суглинистой почвы при сжатии [Текст] / С.И.Старовойтов, Н.П.Старовойтова, Н.Н. Чемисов // Материалы Международной научно-практической конференции «Молодежь и инновации» Белорусской ГСХА. - Республика Беларусь, Горки: Издательство Белорусской ГСХА. – 2011 - с. 20.

53. Старовойтов, С.И. К расчету ножа пробоотборника [Текст] / С.И.Старовойтов, В.Н. Блохин, Н.Н.Чемисов // Вестник ФГОУ ВПО «Брянская ГСХА».-Издательство Брянской ГСХА.-2011-с. 48-50.

54. Старовойтов, С.И. Датчики перемещения [Текст] / С.И. Старовойтов, Н.Н. Чемисов // Сборник материалов международной научно-

практической конференции «Проблемы энергетики и природопользования. Вопросы безопасности жизнедеятельности и экологии». -Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2010. - с.197.

55. Старовойтов, С.И. Твердость и влажность среднесуглинистой почвы в условиях засушливого лета 2010 года [Текст] / С.И. Старовойтов, Н.П. Старовойтова, Н.Н. Чемисов // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Проблемы энергообеспечения, информатизации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК». -Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2011. -С. 183-186.

56. Старовойтов, С.И. Программа для определения перемещений фрагментов почвенного массива [Текст] / Н.Н. Чемисов, С.И. Старовойтов // Научные труды КФ ГРАУ - МСХА-КАЛУГА: Издательство «Эйдос», 2011. - С. 207-210.

57. Старовойтов, С.И. Программа для определения микроперемещений / Н.Н. Чемисов, И.М. Ходаркевич, С.И. Старовойтов // Материалы Международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитие инновационных процессов в экономике, науке, образовании» [Текст]+[Электронный ресурс]. Ред. И.А. Лагерева. - Брянск, Издательство БГТУ, 2010. - с. 30.

58. Старовойтов, С.И. Устройство (бур) для получения образцов грунта (почвы) [Текст] / В.Н. Блохин, С.И. Старовойтов, Н.Н. Чемисов // Патент на полезную модель №103125.-2011.

59. Старовойтов, С.И. Mause Loger [Текст] / И.М. Хадаркевич, Н.Н. Чемисов, С.И. Старовойтов, В.П. Лапик // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.-№2011613827.- Зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 17. 05. 2011.

60. Старовойтов, С.И. К определению модуля упругости первого рода почвенных образцов ненарушенной структуры [Текст] / С.И. Старовойтов, В.Н. Блохин, Н.Н. Чемисов // Методические указания к факультативным занятиям по дисциплине «Механика грунтов, основания, фундаменты». - Брянск: Издательство Брянской ГСХА, 2012.

61. Старовойтов, С.И. Коэффициент трения скольжения почвы [Текст] / С.И. Старовойтов, Н.Н. Чемисов // Сборник научных трудов XXIV Международной научно-практической конференции «Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения». - Брянск, 2012.-139 с.

62. Старовойтов, С.И. Коэффициент внутреннего трения среднесуглинистой почвы при влажности устойчивого завядания [Текст] / С.И. Старовойтов, В.Н. Блохин, Н.Н. Чемисов // Сборник научных тру-

дов XXIV Международной научно-практической конференции «Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения». -Брянск, 2012.-143 с.

63. Старовойтов, С.И. К определению коэффициента Пуассона среднесуглинистой почвы [Текст] / С.И. Старовойтов, Н.Н. Чемисов // Сборник научных статей IV Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные процессы в АПК».-М.: Издательство РУДН, 2012.- с. 280.

64. Старовойтов, С.И. Исследование вязкости среднесуглинистой почвы [Текст] / С.И. Старовойтов, Н.Н. Чемисов // Вестник МГАУ имени В.П.Горячкина. -2011. - №2. - с. 55-56.

65. Старовойтов, С.И. К определению предела прочности на растяжение среднесуглинистой почвы [Текст] / С.И. Старовойтов, Н.П. Старовойтова, Н.Н. Чемисов // Труды ГОСНИТИ, т.111, часть 2.-М.:Издательство ГОСНИТИ, 2013.-215 с.

66. Старовойтов, С.И. О крошении суглинистой почвы [Текст] / С.И. Старовойтов, Н.П. Старовойтова, Н.Н. Чемисов // Сельскохозяйственные машины и технологии - Москва, 2014. - №3 - с. 30-33.

67. Старовойтов, С.И. Способ получения образцов грунта ненарушенной структуры [Текст] // В.Н. Блохин, С.И. Старовойтов, Н.Н. Чемисов // Патент на изобретение № 2494396 МПК G01N 33/24. Оpubл.27.09.2013.

68. Старовойтов, С.И. Некоторые структурные и агрофизические свойства почв крестьянско-фермерского хозяйства «Дунин М.Е.» [Текст] / Г.В. Чекин, Е.В. Мартынова, Н.П. Старовойтова, С.И. Старовойтов, Н.Н. Чемисов // Вестник ФГОУ ВПО «Брянская ГСХА». - Брянск: Издательство Брянской ГСХА. - 2011.-с. 48-50.

69. Старовойтов, С.И. Углы внешнего и внутреннего трения суглинистой почвы [Текст] / С.И. Старовойтов, Н.П. Старовойтова, Г.В. Чекин, Н.Н. Чемисов // Труды ГОСНИТИ, т.113.-М.: Издательство ГОСНИТИ, 2013.-68 с.

70. Старовойтов, С.И. Устройство для определения коэффициента Пуассона почвы (грунта) [Текст] / С.И. Старовойтов, Н.П. Старовойтова, Н.Н. Чемисов // Патент на полезную модель №142873 МПК G01N 3/42. Оpubл.10.07.2014.

71. Староднинский, Д.З. Пути снижения энергоемкости работы почвенных фрез [Текст] / Д.З. Староднинский // Тракторы и сельхозмашины.- 1987. - №4.- с. 32.

72. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле [Текст] / С.П.

Тимошенко. - М.: Государственное издательство физико-механической литературы, 1959.-288 с.

73. Халанский, В.М. Сельскохозяйственные машины [Текст] / В.М. Халанский, И.В. Горбачев. - М.: КолосС, 2003. - 56 с.

74. Цытович, Н.А. Механика грунтов [Текст] / Н.А. Цытович. - М.: Высшая школа, 1973. - 38 с.

75. Цытович, Н.А. Механика грунтов [Текст] / Н.А. Цытович. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. - 138 с.

76. Чирков, Ю.Н. Агрометеорология [Текст] / Ю.Н.Чирков.- Ленинград, 1979.- 145 с.

77. Яцук, Е.П. Ротационные почвообрабатывающие машины [Текст] / Е.П. Яцук.-М.: Машиностроение, 1971.- 91 с.

78. ASTM D1196-93. Standart Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. 2004.

79. Engineer Manual. EM 1110-2-1906.

80. Xiong, Yu. Field evalution of ground stiffness by static and dynamic test / Yu Xiong // .EJGEPapers.(<http://www.ejge.com/2004>).

Научное издание

Яков Петрович Лобачевский

Сергей Иванович Старовойтов

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ

Монография

Редактор Павлютина И.П.



Подписано к печати 12.01.2015 г. Формат 60x84 /16.
Бумага писчая. Усл. п. л. 5,34. Тираж 1000 экз. Изд.№2887.

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянская ГСХА