

И.М. Панов, В.И. Ветохин

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ



Киев 2008

И.М. Панов, В.И. Ветохин

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕХАНИКИ ПОЧВ**

МОНОГРАФИЯ

**Киев
«Феникс»
2008**

УДК 631.31

Рекомендовано к печати

*Ученым советом Национального технического университета Украины
«Киевский политехнический институт» 08.09.2008 (протокол № 8)*

Рецензенты: **Кушнарев А.С.** - Член- корреспондент НААН Украины,
Д-р техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник УкрНИИПИТ им.Л.Погорелого;
Дубровин В.А. - Д-р техн. наук, профессор,
директор научно-исследовательского института
экобиотехнологий и биоэнергетики
Национального аграрного университета Украины;
Ванин В.В. - Д-р техн. наук, профессор,
декан физико-математического факультета НТУУ «КПИ»;
Юрчук В.П. - Д-р техн. наук, профессор НТУУ «КПИ»

Панов И.М., Ветохин В.И.

Физические основы механики почв / И.М. Панов, В.И.Ветохин. - К.:
Феникс, 2008, - 266с.: илл.

ISBN 978-966-651-621-6

В монографии изложены теоретические основы деформации и разрушения почв с использованием моделей сплошной и дискретной сред, динамические и физические процессы стружкообразования при резании почвы, экологические и энергосберегающие аспекты современного земледелия. На основе анализа и обобщения результатов научных исследований и достижений в области физики почвогрунтов намечены пути и средства снижения энергозатрат на процесс обработки почвы и повышение его качества. Показана взаимосвязь физических явлений при почвообработке с формами и параметрами рыхлителей. Приведены примеры реализации теоретических положений в конструкциях почвообрабатывающих орудий.

Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов агроинженерных Вузов и специалистов сельхозмашиностроения.

ББК 40.72

ISBN 978-966-651-621-6

© Панов И.М., Ветохин В.И. 2008

ВВЕДЕНИЕ

Обработка почвы является наиболее древним занятием человечества при производстве продуктов питания. При переходе от кочевого к оседлому образу жизни для поддержания своего существования человек впервые применил примитивные орудия для рыхления почвы и образования борозд с укладкой в них семян сначала диких, а затем культурных растений. Академик В.П. Горячкин предложил схему развития плуга от криволинейной заостренной палки до сохи с отвалом. С полным основанием можно сказать, что вся история развития почвообрабатывающих орудий тесно связана с общим прогрессом и развитием цивилизации. Рухадловый (рыхлящий) отвал был предложен в Германии, винтовая поверхность отвала была обоснована работами Лямбручини и Ридольфи (Италия). Плуг с предплужником был впервые изготовлен в Германии Рудольфом Сакком. В России было налажено производство конных плугов с передком конструкции А. Павлова (г. Рязань) и Генна (г. Одесса). Современные плуги, оснащенные корпусами различной формы для тракторов разного класса тяги, выпускаются фирмами всех развитых стран.

Для удовлетворения требований агротехники для посева и посадки различных сельскохозяйственных культур в дополнение к отвальным плугам шло развитие и совершенствование других почвообрабатывающих машин и орудий: культиваторов, борон, катков, дисковых орудий, фрез. Благодаря широкой механизации всех технологических процессов обработки почвы по данным П.У. Бахтина [12] земледельцами всего мира ежегодно обрабатывается около 1,5 млрд. га, что соответствует объему переработанной почвы почти в 6000 км³. Это сравнимо по объему и скорости с геологическими горообразовательными

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

процессами. В Российской Федерации по средним статистическим данным пахотные площади составляют почти 120 млн. га, на Украине – около 40 млн. га. На их обработку ежегодно расходуется более 3 млн. т горючего или до 40% всех энергетических и до 25% трудовых затрат в полеводстве. Считается общепризнанным, что урожайность сельскохозяйственных культур на 25% зависит от качества обработки почвы. Учитывая это, а также грандиозность воздействия человека на почву, необходим взвешенный подход к выбору систем земледелия и средств механизации, так как любая ошибка в этом ведет к невосполнимым потерям урожая на больших площадях.

Низкому уровню производительных сил в обществе соответствовало экстенсивное земледелие, которое основывалось на неумеренном использовании потенциального плодородия почвы при обработке примитивными орудиями. Истощенные почвы восстанавливались с помощью залежной и переложной систем земледелия. Применение отвального плуга сначала на животной, а затем на тракторной тяге повысило эффективность земледелия, благодаря вовлечению в севооборот более глубоких слоев почвы. Широкое применение отвальной вспашки позволило перейти от экстенсивного к интенсивному использованию сельхозугодий путем введения паровой, плодосменной и травопольной систем земледелия [85].

Однако интенсивные системы земледелия, основанные на многократных проходах по полю все более мощных и тяжелых машинно-тракторных агрегатов, лишении почвы растительного покрова, привели к расширению зон ветровой и водной эрозии. Поэтому в качестве альтернативы в середине двадцатого столетия получили развитие почвозащитные системы земледелия, называемые в России системами Т.С. Мальцева и А.М. Бараева, Украине Н. К. Шикеры и Ф.Т. Моргуна. Но

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

и эти системы имели ряд негативных последствий: после безотвальных плугов и плоскорезов образовывались уплотненные почвенные «подошвы», что приводило к нарушению водно-воздушного режима, вымоканию посевов, засорению сорняками. Не всегда обеспечивалось достаточное качество крошения почвы. В настоящее время стало ясно, что современные системы земледелия наносят вред не только плодородному горизонту почвы, но и всей окружающей среде за счет сноса верхнего плодородного слоя почвы в водоемы и низины вместе с остатками токсичных химикатов [36, 43, 45, 76, 77, 113]. Для выхода из создавшегося положения остро встала проблема **экологизации** земледелия, придания механической обработке почвы функций регулирования не только агротехнических, но и физических параметров почвы.

Следует отметить, что до настоящего времени не разработана научная теория механических процессов обработки почвы. Поэтому актуальным остается высказывание академика В.П. Горячкина о том, что «вопрос о деформации пласта составляет камень преткновения для всякого рода теоретических исследований» [31]. Фрагмент исследования по «теории разрушения почвы», предложенный В.П. Горячкиным, основан на представлении почвы как сплошной среды с изотропными свойствами и не отражает строения и свойств реальной почвы. Выведенная им рациональная формула силы тяги плуга имеет формально-логический характер, но не раскрывает физической сущности процессов резания почвы. Значительный вклад в развитие основных вопросов теории механической обработки почвы внесли труды М.Х. Пигулевского, Г.И. Покровского, В.В. Кацыгина, А.Н. Гудкова, Г.Н. Синеокова, В.А. Желиговского, Т.М. Гологурского, А.С. Кушнарева, M.L. Nichols, W.R. Gill, W. Soehne и многих других. Под влиянием работ В.П. Горячкина были начаты систематические исследования процессов

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

резания грунтов землеройными машинами (М.Г. Домбровский, И.Я. Айзеншток, Ю.А. Ветров, А.Н. Зеленин и др.). Трудami перечисленных ученых создана научная дисциплина «Механика грунтов», в которой накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал по резанию грунтов клинообразными рабочими органами. Однако механика грунтов базируется в основном на идеализированных методах сплошной среды.

Реальные почвы, как естественного сложения, так и старопахотные, представляют собой полидисперсные структурные среды с распределенным в них множеством различных дефектов и дислокаций, которые существенным образом влияют на качество и сопротивление почвы при ее обработке. Однако вопросы деформации и разрушения почв как дискретных сред еще совершенно недостаточно отражены в научной литературе.

В предлагаемой монографии дан анализ, как собственных исследований, так и работ других авторов по механике почв, а также рассмотрены динамические и физические процессы, происходящие при взаимодействии рабочих органов машин с почвой. Сделана попытка прогноза развития механики почв на ближайшее будущее.

Под предметом механики почв будем понимать изучение закономерностей взаимодействия рабочих органов почвообрабатывающих машин с почвой с учетом физических процессов, сопровождающих деформацию и разрушение, т.е. отделение стружки от монолита пласта. При этом основное внимание уделяется изучению напряженно-деформированного состояния отрезаемой стружки с учетом прочностных и релаксационных свойств почвы. Важное значение для механики почв имеет выбор расчетной модели почвы, наиболее полно соответствующей реальной анизотропной, полидисперсной и гетерогенной среде.

Глава 1. Экологические аспекты механической обработки почвы

Анализ научных публикаций показывает, что при современном состоянии земледельческой механики, а также конструкций технических средств в 21 веке механический способ обработки почвы на тракторной энергетике останется преобладающим со всеми его положительными и отрицательными последствиями. Так, в настоящее время, половина пахотных площадей России имеет недостаточное содержание гумуса, четвертая часть из них нуждается в известковании, более 20 млн. га в гипсовании и мелиоративной обработке, почти 60% посевных площадей находятся в эрозионноопасных зонах [45]. От ветровой и водной эрозии ежегодно теряется почти 3 млрд. т плодородной почвы, что соответствует 40...42 млн. т питательных веществ, т.е. их теряется больше, чем вносится с удобрениями. Не прекращается образование оврагов, средняя скорость роста которых составляет 1...1,5 м в год [71]. Эрозия и деградация пахотного горизонта снижает продуктивность сельскохозяйственных угодий. Недобор урожая на эродированных почвах достигает до 30% [36, 76]. Вследствие увеличения массы мобильной техники за последние 20...25 лет твердость почвы верхних слоев увеличилась в 1,3...1,4 раза, а глубина уплотненного слоя достигает 1,5 м [42].

В.А. Ковда [64] указал на ряд главных факторов, снижающих плодородие почв. Основными из них являются: развитие эрозионных процессов на полевых и пастбищных угодьях, истощение запасов в почве органических веществ и отрицательный баланс гумуса, переуплотнение пахотного горизонта, ухудшение водного и воздушного режимов питания сельскохозяйственных культур, временное подтопление или иссушение почвы, низкое качество работы почвообрабатывающих машин и орудий.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Негативные явления современных систем земледелия вызвали интенсивные поиски новых технологий возделывания сельскохозяйственных культур и способов обработки почвы.

В прошлом веке во многих странах проходили проверку такие технологии как «щадящая», «минимальная», «безгербицидная», «нулевая», «гребневая» и др. [101]. Основами всех новых технологий являлись минимализация числа и глубины обработок, зарегулированность стока дождевых и талых вод, повышение эрозионной стойкости поверхности поля путем оставления незаделанной части стерни. Таким образом, все новые технологии имели почвозащитную направленность.

Однако широкие испытания показали, что не все новые технологии способны коренным образом решить проблему экологизации земледелия. Дело в том, что сам по себе механический способ обработки почвы, лежащий в основе всех технологий, может быть причиной нарушения экологического равновесия, так как имеет двойственный характер воздействия на почву. С одной стороны, обработка почвы должна придавать обрабатываемому слою оптимальное крошение и строение для обеспечения благоприятных водного, воздушного, теплового и пищевого режимов произрастания сельскохозяйственных культур. С другой стороны, механическая обработка приводит к разрушению структуры почвы, к усилению минерализации органических веществ, нарушению воздушного и водного баланса при обработке пересушенных или переувлажненных почв. Таким образом, механическая обработка – это мощный регулятор не только почвообразующих, но и почворазрушающих процессов. В зависимости от способа обработки, глубины и периодичности механической обработки можно назвать такие принципиально противоположные процессы, происходящие в почве: минерализация – гумификация, оструктурирование – дезагрегация, приход –

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

расход влаги, уплотнение – разуплотнение, гомогенизация – гетерогенизация строения обрабатываемого слоя, уменьшение – увеличение корнеобитаемого слоя и др. [113]. Из этого следует, что экологизация механической обработки означает, прежде всего, усиление почвообразующих факторов, в том числе:

- сохранение оптимальной плотности сложения обработанного слоя почвы;
- оптимальное крошение почвы;
- максимальное сопротивление эрозионным процессам (смыву и выдуванию);
- сохранение структурных микро- и макроагрегатов, обладающих механической и водной прочностью;
- обеспечение необходимого строения обработанного слоя, рыхлого верхнего и уплотненного нижнего ложа для семян;
- сохранение и накопление почвенного гумуса;
- обеспечение оптимальных условий для жизнедеятельности живой почвенной среды (микрофлоры и микрофауны);
- разуплотнение пахотного и подпахотного горизонтов почвы;
- увеличение корнеобитаемого слоя почвы.

Как отмечает известный агрофизик И.Б. Ревут [111, 115] «для отыскания наиболее эффективных путей и приемов оптимизации почвенных условий жизни растений и полезных микроорганизмов необходимо углубленное знание физики почв. Примером глубочайшей ошибки в земледелии, основанной на забвении законов физики почв и повлекшей череду негативных явлений на громадной территории пахотных земель, является травопольная система земледелия В.Р. Вильямса» [26].

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

В.Р. Вильямс теоретически обосновал вспашку с оборотом пласта отвальным плугом с предплужником, однако его теория не учитывала различную роль верхней и нижней части пахотного слоя в создании эффективного плодородия почвы. Ученый считал, что пахотный слой дифференцируется на слои с различной структурой. Структура более глубоких горизонтов якобы восстанавливается корневой системой культурных растений (прежде всего многолетних трав), формирующих водопрочные почвенные агрегаты (комки). Этот оструктуренный слой при зяблевой вспашке поднимался вверх, а верхний слой, якобы утративший структуру, сбрасывался предплужниками вниз. Эта теория искусственно ограничивала мощность пахотного горизонта в пределах 20...22 см независимо от возделываемых культур и типа почвы [12]. В противоположность В.Р. Вильямсу, многие ученые отвергали положение о резком ухудшении физических и агрохимических свойств верхней части пахотного слоя (0...10 см), и наоборот утверждали, что свойства верхней части лучше, чем нижней. Опытами И.Б. Ревута было установлено, что наибольший урожай получается в сосуде, почва которого взята из самого верхнего слоя 0...7 см, а наименьший – из самого нижнего слоя 14...21 см и, что особенно важно, перемешанная почва из всех слоев давала сравнительно высокий урожай. Так было доказано, что на протяжении вегетационного периода в верхней части пахотного слоя почвы, благодаря воздействию на нее солнечного света и тепла, кислорода воздуха, микрофлоры, корней однолетних растений создаются более благоприятные физические и агрохимические условия, чем в нижнем слое. Эти новые положения позволили, во-первых, достаточно быстро внедрить более прогрессивную систему безотвальной обработки почвы (системы Т.С. Мальцева и А.М. Бараева), а, во-вторых, снять запрет, наложенный В.Р. Вильямсом на применение в полеводстве фрезерных и ротационных

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

машин [100]. После работ Л.Н. Некрасова и А.П. Антипина [86], а также А.Д. Далина и П.В. Павлова [40] были сделаны выводы о том, что фреза обеспечивает более совершенное крошение почвы, чем отвальный плуг при совместной работе с дополнительными орудиями. Кроме того, фрезерование создает благоприятные условия для биологической деятельности микроорганизмов. И.Б. Ревут и его сотрудники доказали, что повышение эффективного плодородия пахотного слоя можно достичь в результате перемешивания всех слоев почвы с помощью фрезы [112, 116]. Определение влияния вспашки ротационным плугом РП-190 на агробиологические и физические свойства почвы были проведены в Чехии (г. Брно) [151, 152]. Двухгодичные наблюдения показали, что на черноземных почвах на посевах озимой пшеницы и сахарной свеклы на участках, обработанных ротационным плугом на фрезерных режимах, снабжение растений влагой в течение всего вегетационного периода улучшилось. По результатам исследований ротационного плуга А. Странак и К. Риджки сделали следующие выводы:

1. С помощью ротационного плуга выполняется столь качественная обработка почвы, что для подготовки ее к посеву требуются значительно меньшие расходы, чем при вспашке отвальным плугом.
2. Не образуется уплотненной подошвы, отрицательно влияющей на урожай.
3. Применение ротационного плуга не зависит от погодных условий, т.к. он успешно может работать как на сухих, так и на переувлажненных почвах и даже на залитых водой рисовых чеках [110].

Из изложенного следует, что дальнейшая интенсификация и энергонасыщение земледелия неизбежно ведет к усилению антропогенной нагрузки на пахотный слой почвы и приводит к его эродированию и деградации. Неумеренная механическая обработка, лежащая в основе всех

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

современных технологий обработки почвы является главной причиной нарушения естественных природоохранных процессов по саморегулированию потенциального плодородия [135]. Негативное проявление механической обработки почвы усугубляется тем, что крошение пласта практически всеми типами рабочих органов современных почвообрабатывающих машин, в основе геометрии которых заложен простой или криволинейный клин, достигается в основном за счет деформации сжатия, при которой требуется в 10...20 раз больше усилие, чем при растяжении или сдвиге [44]. Например, при работе плужного корпуса давление на лемехе достигает 100...150 кПа, что соизмеримо с давлением колес на почву трактора класса 1,4. По данным А.С. Кушнарева [66] после пахоты объемная масса, образовавшихся почвенных комков в 1,2 раза выше, чем до обработки, а разброс величины объемной массы возрастает в 2 раза. Это свидетельствует о том, что негативное влияние механической обработки на экологические свойства почвы может быть не меньше, чем уплотнение почвы движителями мобильных сельскохозяйственных машин. Под экологией пахотного горизонта мы подразумеваем степень отклонения физических и агробиологических параметров почвы в результате антропогенного воздействия от оптимальных требований жизнедеятельности сельскохозяйственных растений. Поэтому назрела необходимость установить **критерии экологически безопасной механической нагрузки на почву**. Однако пока еще не определено, какие оценки механической обработки должны быть положены в основу экологических критериев.

В качестве одного из таких критериев может быть предложен показатель степени крошения почвы. П.У. Бахтин [13] предложил оценочную шкалу крошения и распыления пашни, обработанной отвальным плугом. Очень хорошей считается такая пашня, когда в ней

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

содержится 90...100% комков размером менее 50 мм и менее 5% пыли (частиц размером менее 0,25 мм); хорошей считается пашня, содержащая 70...90% комков и 5...10% пыли; удовлетворительной – с содержанием 50...70% комков и более 20% пыли. Однако, следует признать, что определение экологической устойчивости пахотного слоя по степени крошения и распыления почвы совершенно недостаточно, т.к., во-первых, степень крошения почвы зависит от множества случайных факторов: типа почвы, ее механического состава, влажности, предшествующих обработок и выращиваемых культур, типа рабочих органов и скоростных режимов работы; во-вторых, существующие методы определения крошения почвы не учитывают вероятностный характер распределения фракций почвенных комков в обрабатываемом слое. Так, если принять нормальный закон распределения степени крошения почвы, то 70%-ная степень крошения составит лишь 20...23% от всей площади пашни, обработанной отвальным плугом [94].

Другим показателем качества механической обработки почвы может служить ее плотность (объемная масса), т.к. плотность почвы является комплексным показателем, зависящим от ее микро- и макроструктуры, механического состава, содержания гумуса, структурности, соотношения составляющих ее фаз и др. Установлено [57, 111], что оптимальная плотность, обеспечивающая наиболее благоприятные условия произрастания сельскохозяйственных культур, имеет вполне определенное значение для каждой культуры и каждого типа почв [127].

Однако обобщенных показателей оптимальной плотности почвы для всех разновидностей типов почв и разных регионов пока нет, что затрудняет практическое использование этого показателя в качестве оценки экологической устойчивости пахотного слоя почвы.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Используя накопленный опыт предшествующих работ, можно ориентировочно наметить следующие предпосылки экологически безопасных приемов обработки почвы:

- по возможности исключать оборот обрабатываемого слоя почвы; отвальную вспашку применять периодически не чаще одного раза в 2-3 года;

- создавать и сохранять на поверхности обработанного поля постоянный мульчирующий слой, состоящий из стерни, растительных остатков и почвенных комков;

- периодически, один раз в 3-4 года проводить глубокое рыхление или щелевание пахотного и подпахотного слоев почвы для ликвидации «плужной подошвы» и повышения инфильтрационных свойств почвы;

- уменьшать глубину и число интенсивных обработок почвы, например, при обработке почвы под озимые зерновые культуры взамен вспашки применять мелкую предпосевную обработку, особенно после непаровых предшественников;

- вести поиски новых нетрадиционных способов обработки почвы и новых форм орудий работающих без использования деформаций сжатия, но с использованием деформации растяжения, сдвига, кручения;

- максимально использовать для крошения пласта имеющиеся в почве многочисленные дислокации в виде трещин, пустот, инородных включений и т.п.

Глава 2. Почва как объект механической обработки

2.1. Краткие сведения о физико-механических свойствах и параметрах состояния почв

Процессы, происходящие в почве под действием рабочих органов почвообрабатывающих машин, изучает механика почв, а именно ее раздел «механика разрушения» с определением внешних и внутренних сил и кинематических параметров движения разрушенных частей почвенного пласта. Термин «разрушение почвы» был введен академиком В.П. Горячкиным [35]. Однако целью механической обработки является не столько разрушение почвы как монолита, а создание благоприятных условий для выращивания урожая, т.е. обеспечение соответствующих значений параметров состояния почвы - структуры, степени крошения и укладки почвенных элементов. Поэтому более правильно говорить о процессах стружкообразования в почве под воздействием рабочих органов почвообрабатывающих машин. В.П. Горячкин говорил, что если в общей технике разрушенный материал (металл, камень, грунт) составляет отброс, то в земледельческой механике получение нужных параметров стружки, т. е. придание почве мелкокомковатости – это цель работы.

С инженерных позиций почва, как и любое другое физическое тело, обладает рядом механических и физических свойств и параметров, связанных с ее происхождением, минералогическим механическим и химическим составом. Одно из свойств - прочность, т.е. способность сопротивляться деформации и разрушению под действием внешних сил. Знание этого своеобразного «почвенного сопромата» (по образному выражению П.У. Бахтина) позволяет более правильно выбирать для каждой почвы и ее конкретного состояния соответствующий тип почвообрабатывающей машины, параметры и режимы рабочих органов.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

В естественном состоянии почва имеет три основные части или фазы: твердую, жидкую и газообразную. Твердая фаза образует скелет почвы, поры между твердыми частицами заполнены водными и газо-воздушными растворами. Все механические и физические параметры почвы зависят от соотношения этих трех основных фаз. Кроме того, в почве имеется также многочисленная «живая фаза» – микрофлора и микрофауна. Иногда почву называют «живым телом» [38], т.к. ее строение, агробиологические и агрофизические свойства во многом зависят от жизнедеятельности «живой фазы».

К **физическим параметрам состояния** почв относятся: значения пределов прочности при различных деформациях, механический состав, влажность, структура, сложение, плотность, объемная масса, удельная поверхность, пористость (скважность) и другие. Отнесение перечисленных параметров к категории «состояние» позволяет рассматривать их как величины переменные, подверженные изменениям и управлению посредством почвообработки, мелиорации, удобрения и т.п.

Механический состав почвы определяется размерной характеристикой или дисперсностью твердой фазы. Дисперсность почвы оказывает существенное влияние на проявление ее физического свойства – **способности структурообразования**. Особенно значительное влияние оказывают пылеватые частицы размером 0,01...0,05 мм и илистые фракции размером менее 0,001 мм. Илистые частицы имеют коагуляционные свойства (свертывание в хлопья), что способствует образованию структуры почвы. Этому также способствуют цементирующие свойства коллоидных фракций с размером частиц менее 0,0001 мм.

Важной характеристикой степени дисперсности твердых частиц служит удельная поверхность, т.е. суммарная площадь частиц в единице

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

массы материала [111]. С удельной поверхностью частиц связано качественное и количественное проявление одного из наиболее важного **обменного свойства** почвы т.е. способности обеспечивать энерго массо обмен и соответственно течение физических, химических, и биологических процессов.

Удельная поверхность возрастает с уменьшением размера частиц. Так, для песка (частицы размером 0,5...0,25 мм) суммарная удельная поверхность равна 1,38 м²/г, а для глины - 966,7 м²/г, т.е. почти в 1000 раз больше. Твердая фаза составляет от 40 до 60% общего объема почвенного пласта. Жидкая и газообразная фазы почвы постоянно перемещаются по порам и капиллярам между твердыми частицами. Таким образом, почвенный пласт можно представить как «объемную твердую решетку (скелет), заполненную жидкими и газообразными подвижными веществами» [37].

Структура почвы. С увеличением дисперсности твердой фазы, а, следовательно, с возрастанием удельной поверхности частиц, под действием поверхностных, электрохимических и цементационных сил, возрастает способность первичных почвенных элементов к образованию комков: микроагрегатов (размером меньше 0,25 мм) и макроагрегатов (размером больше 0,25 мм). Прочность микро- и макроагрегатов достаточно высока. Поэтому связи между структурными агрегатами можно разрушить только в результате химической или физической обработки. Свойство почвы образовывать почвенные агрегаты и является **структурообразующей способностью**. Образование структуры происходит под влиянием различных факторов, например, при увлажнении и высыхании, под действием корневой системы растений, под влиянием деятельности животных и червей. Сильнейшим структурообразующим фактом считается наличие в почве гумуса.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Механическая обработка почвы при оптимальной влажности («спелой почвы») обеспечивает высокий структурообразующий эффект. Структурные почвы имеют более высокие агробиологические показатели, лучше обеспечивают обменные водный, воздушный и питательный режимы, а также имеют меньшее сопротивление при обработке. Наиболее ценными считаются агрегаты размером 2...10 мм, которые образуют комковато-зернистую структуру почвы.

Структурность почвы принято характеризовать соотношением

$$K = \frac{C}{B} \cdot 100, \%, \quad (2.1)$$

где C – количество макроагрегатов размером от 0,25 до 7 мм; B – сумма агрегатов размером от 0,25 до 10 мм.

Таким образом, механические свойства и параметры состояния почвы, как твердого тела непосредственно связаны с ее структурой и силами сцепления между почвенными агрегатами. Структурные связи, возникающие в монолите почвы, во многом обуславливают характер напряженно-деформированного состояния под действием внешних и внутренних сил. Следовательно, под структурой почвенного пласта нужно понимать дисперсную структуру мелкозернистого твердого тела с включением в него различного рода дефектов. Фиксация почвенного профиля парафином, разработанная М.Х. Пигулевским [102], подтвердила пространственное строение коагуляционных структур почвы. На рис. 2.1 показана структура глины при увеличении в 10 тыс. раз. На рисунке видно, что между относительно крупными частицами ила расположены частицы глины 1 и хлопьевидные скопления коллоидных частиц 2 и 3, образующих губчатую структуру.

С учетом пространственного строения почвенного пласта и составляющих его элементов, необходимо рассматривать влияние

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

механической обработки на состояние почвы на разных уровнях. А именно: на макроуровне – для обрабатываемого слоя в целом, когда образуются макроагрегаты; на мезоуровне – для отдельных макроагрегатов и пор; на микроуровне – для отдельных гранулометрических фракций и межагрегатных связей на границе раздела микроагрегатов твердой фазы с жидкой и воздушной фазами.

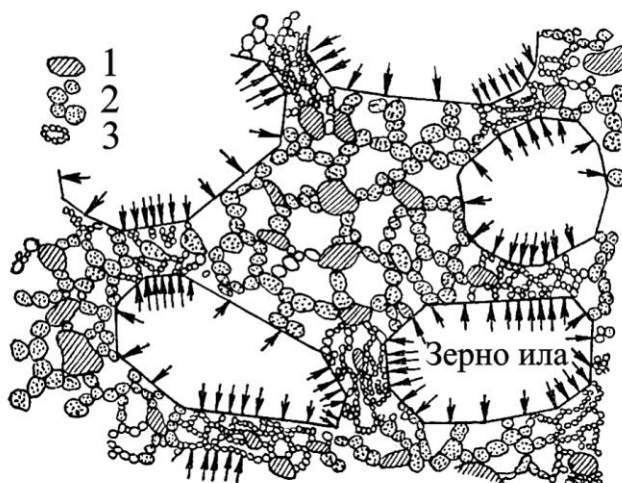


Рис. 2.1. Структура глины (по М. Рейнеру):
1 – частицы глины; 2, 3 – коллоидные частицы

Следует учитывать, что оструктуренные почвы более устойчивы к механическому воздействию и сохраняют благоприятное сложение при многократных обработках, увлажнении и высушивании. В структурной почве создается равновесное состояние капиллярной и некапиллярной пористости: между микроагрегатами преобладают некапиллярные поры, внутри агрегатов – капиллярные поры.

В бесструктурных почвах первичные твердые элементы располагаются плотно, поэтому в ней преобладают капиллярные поры.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Эти особенности структурных и бесструктурных почв оказывают большое влияние на параметры их механической прочности.

Более подробные сведения о физико-механических, водно-воздушных, тепловых и технологических свойствах почв можно найти в работах [111, 122].

2.2. Обоснование расчетной модели почвы

Из вышеизложенного следует, что в естественном состоянии почва не является монолитной, а представляет собой полидисперсное структурное образование с выраженными межагрегатными связями, поры которого заполнены водными растворами и газовой средой. Сложность строения почвенного пласта на микро- и макроуровнях обуславливает наличие анизотропии механических и физических параметров. Поэтому выбор расчетной модели, которая позволяла бы имитировать поведение оригинала и давала бы возможность прогнозировать его реакцию на внешние силовые воздействия, представляет большую трудность. В механике почв, как и в механике грунтов, при решении свойственных им задач принято допускать некоторые упрощения свойств и рассматривать идеализированные материалы [30]. По М.Н. Гольдштейну все многообразие моделей почво-грунтов сводится к двум основным моделям: **сплошной и дискретной сред**. Рассмотрим две эти модели более детально.

Общепринято, что **сплошная среда** непрерывно заполняет рассматриваемую часть пространства. Более точно дает определение Ю.Н. Работнов [109]: «Среда называется сплошной, если любой объем, выделенный из нее, содержит вещество, т.е. имеет массу». Плотность ρ такой среды определяется как предел отношения массы Δm , содержащейся

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

в некотором малом объеме ΔV , к величине этого объема, когда он стремится к нулю

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}. \quad (2.2)$$

Очевидно, что представление о сплошной среде противоречит данным о дисперсном структурном строении реальной почвы. Действительно, если рассматривать малые объемы, то может оказаться, что в одном объеме находится хотя бы один микроагрегат, а в другом объеме – только пространство между агрегатами или межагрегатная пора, т.е. этот объем не будет иметь массы. Несмотря на это противоречие, модель сплошной среды широко используется в механике грунтов и почв, т.к. это значительно упрощает математическое описание законов движения деформированной почвы и позволяет рассматривать напряжения и деформации бесконечно малых объемов, переходя от них к напряженному состоянию всего пласта.

Следует также отметить, что закономерности поведения почвогрунтов под нагрузкой, основанные на модели сплошной среды, имеют феноменологический характер, поэтому их правильность должна подтверждаться экспериментально.

Дискретная среда представляется в виде системы бесчисленного числа отдельных микро и макроскопических частиц, связанных между собой межагрегатными связями. Поэтому под влиянием внешней нагрузки в дискретных средах необходимо учитывать деформации скелета и водно-воздушных фаз, заполняющих поры. Дискретные модели больше соответствуют свойствам реальных почвогрунтов, но модели сплошной среды обладают, как указано выше, преимуществом простоты для расчетов. Изучением поведения дискретных сред, как совокупности множества макроскопических зерен, занимается статистическая механика

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

на основе теории вероятностей и математической статистики. Изучение дискретных сред применительно к грунтам было начато Г.И. Покровским еще в 30-х годах прошлого века [30, 104]. Однако, в дальнейшем, это направление было незаслуженно забыто.

Необходимо отметить, что в принимаемой современной модели почвы как сплошной среды сохраняются свойства пористости и многофазности строения почвы, как в бесконечно малом объеме, так и в конечном объемах. Для избежания логической неувязки этого положения говорят не о бесконечно малом объеме, но об объеме достаточно малом по сравнению с рассматриваемым массивом почвы. М.Н. Гольдштейн со ссылкой на Н.М. Герсегонова [28] и Г.И. Покровского [105] утверждает, что условие сплошной среды сохраняется, если сторона единичной квадратной площадки, для которой рассчитывается напряжение, превосходит диаметр частиц грунта не менее чем в 20...30 раз. То есть, если рассматривать единичную площадку со стороной в 1 см, то грунт должен иметь частицы не крупнее 0,5...1,0 мм.

Учитывая для сплошной среды многофазное строение при соответствующих условиях можно представлять почвогрунты с твердообразными и жидкообразными свойствами, а при различных сочетаниях первых двух – и почвогрунты с реологическими свойствами (см. ниже главу 6).

Таким образом, почва как объект механического воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин принимается нами в виде двух моделей: модернизированной сплошной среды и дискретной среды. В первом случае ее поведение подчиняется законам механики сплошной среды, а во втором – привлекаются законы теории вероятностей и она подчиняется законам статистической механики.

Глава 3. Напряженно-деформированное состояние и прочность почв

Научная теория механической обработки почвы с учетом ее реальных физико-механических свойств до настоящего времени еще не разработана. Предложенный акад. В.П. Горячкиным фрагмент «Теории разрушения почвы» [35] основан на положениях теории сплошной среды и теории прочности Кулона – Мора. Однако в этой теории не учитываются реальные свойства почвы, она основана на гипотезе сплошной среды.

Для разработки физической теории деформации и разрушения почв необходимо критически рассмотреть накопленный теоретический и экспериментальный материал по механической обработке почвогрунтов различными рабочими органами почвообрабатывающих и землеройных машин, учитывающий анизотропность свойств реальных почв. Особое внимание должно быть уделено физическим процессам, происходящим при взаимодействии рабочих органов с почвой.

Предварительно рассмотрим природу прочности почвогрунтов. Внешние нагрузки, статически приложенные к некоторому объему почвы, передаются на весь массив и создают в нем внутренние усилия, интенсивность которых характеризуется **напряжением**. Если на площадке ΔF среды действует сила ΔP , то напряжение в точке выразится

$$\sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F}. \quad (3.1)$$

Принято, что деформация сплошной среды не нарушает представления о сплошности структуры как упругого, так и пластичного материалов [90]. Поэтому в общем случае под прочностью среды понимают способность ее сохранять сплошность при деформациях. Предел прочности наступает тогда, когда связи между частицами

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

материала разрываются, частицы отделяются друг от друга, сплошность тела нарушается [30]. М.Н. Гольдштейн определяет прочность как свойство материала сопротивляться хрупкому разрушению или наступлению неограниченного деформирования – течения.

3.1. Природа прочности и деформации почвогрунтов

Монолитная почва состоит из почвенных агрегатов, которые имеют различную форму и размеры и связаны между собой силами, имеющими физическую, химическую, электрическую и механическую природу. Поэтому прочность почвогрунтов зависит от слагающих их частиц и связей между ними. Большую роль в создании прочности почвогрунтов играет внутреннее сцепление. Н.А. Цытович [133] различает следующие силы сцепления дисперсных почвогрунтов: молекулярные, цементационные, структурно-коллоидные, водно-адсорбционные и механические. Для большинства супесчано-суглинистых почвогрунтов прочность связей между частицами значительно меньше, чем прочность самих частиц. Поэтому почвогрунты разрушаются преимущественно по связям между частицами. Механическое разрушение почвогрунтов следует рассматривать как преодоление связей. Там, где такие связи имеют наименьшую прочность, происходит разрыв или нарушение монолитности [19].

Сложность природы разрушения почвогрунтов является одной из главных причин использования для объяснения физических процессов при их разрушении методов теории упругости и пластичности. Рассмотрим некоторые закономерности поведения почвогрунтов при различных деформациях.

3.2. Сопротивление почв различным деформациям

Как показано выше, способность почв оказывать сопротивление различным деформациям обусловлена наличием структурных связей и сцеплением между частицами и структурными агрегатами. Прочность связей между частицами по сравнению с прочностью минеральных частиц скелета мала, поэтому основным фактором, влияющим на прочность почвы, является прочность ее структурных связей. Следовательно, изучение последних важно для установления природы прочности и характера напряженно-деформированного состояния под действием внешних и внутренних сил [51].

Природа структурных связей сложна и обусловлена комплексом факторов (кристаллизацией коллоидов, межмолекулярными и электрохимическими явлениями, действием биоты почвы и др.).

Механическое крошение связных почв следует рассматривать как результат преодоления внутренних связей между частицами. С увеличением дисперсности почвенных частиц их удельная поверхность увеличивается, и значительно возрастают молекулярные силы поверхностного взаимодействия. Необходимо отметить, что прочностные свойства полидисперсных почвогрунтов в значительной мере зависят от их влажности, так как водные пленки, окружающие частицы и агрегаты, значительно ослабляют межструктурные связи.

Все виды деформаций, испытываемых почвогрунтами, могут быть подразделены на два основных вида: объемные деформации **сжатия** - при этом почвенные частицы укладываются более плотно, деформации **сдвига** - при этом почвенные частицы смещаются относительно друг друга, и деформации **растяжения-расширения** - при этом почвенные частицы укладываются менее плотно [6].

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Отличительной особенностью почвогрунтов, например, от металлов, является то, что степень и величина деформации их зависят как от типа взаимодействующих рабочих органов, так и от физико-механических свойств обрабатываемой среды (дисперсности, механического состава, структурности, влажности, задернелости и др. факторов). Под воздействием одних и тех же рабочих органов одна и та же почва в различных состояниях будет деформироваться по-разному. Твердые, сухие почвы будут незначительно деформироваться и разрушаются при значительных нагрузках. У таких почв интервал между пределом упругости σ_{II} и пределом прочности σ_{B} (временное сопротивление) имеет незначительную величину. Твердые почвы рационально разрушать ударными нагрузками. Те же почвы во влажном состоянии деформируются при небольших усилиях, но выдерживают сильные удары. Вязкие почвы имеют большой интервал между пределом упругости и пределом прочности [54].

В.П. Горячкин [33] предложил все материалы разделить на три категории: хрупкие, вязкие и пластичные, различие свойств которых наглядно характеризуются кривыми напряжения в функции деформации (рис. 3.1). Как будет показано ниже – это весьма условная характеристика упругости, вязкости и пластичности материалов.

При воздействии рабочих органов почва испытывает различные виды деформации: сжатие, растяжение, сдвиг, кручение, изгиб и более сложное деформированное состояние, являющееся комбинацией перечисленных простых деформаций. По данным В.В. Царицына [132] основным видом деформации при разрушении горных пород является деформация сжатия. Другие виды деформации, проявляющиеся при разрушении – растяжение, изгиб, сдвиг составляют от 2 до 10% от сжатия.

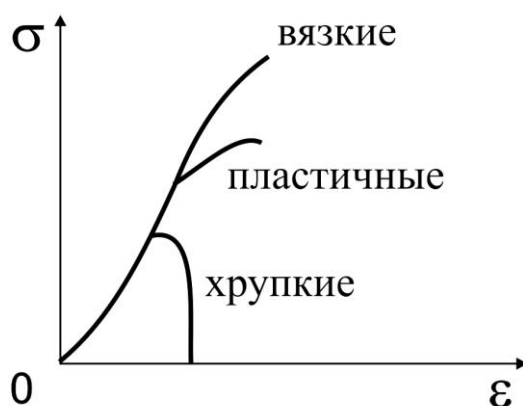


Рис. 3.1. Зависимость напряжения от деформации для различных состояний материала (по В.П. Горячкину)

Превалирующее значение деформация сжатия имеет и при резании почв. В.П. Горячкин указывал, что сущность работы клинообразного рабочего органа состоит не в резании лезвием, а в сжатии частиц, которое распространяется на некоторое расстояние, после чего образуется трещина в горизонтальном направлении, получившая название опережающей трещины [31].

Для определения прочностных и деформационных характеристик проводят испытания образцов почв и грунтов на специальных приборах, имитирующих соответствующие виды деформации [78, 128].

На рис. 3.2 приведены характерные диаграммы растяжения и сжатия образцов глинистой почвы. На диаграммах можно отметить несколько характерных точек. Начальный участок OA на обеих диаграммах близок к прямой, т.е. напряжение σ пропорционально деформации ε и зависимость $\sigma(\varepsilon)$ подчиняется закону Гука

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$\sigma_{II} = E\varepsilon, \quad (3.2)$$

где σ_{II} – напряжение соответствующее пределу пропорциональности;
 E – модуль упругости, Н/м².

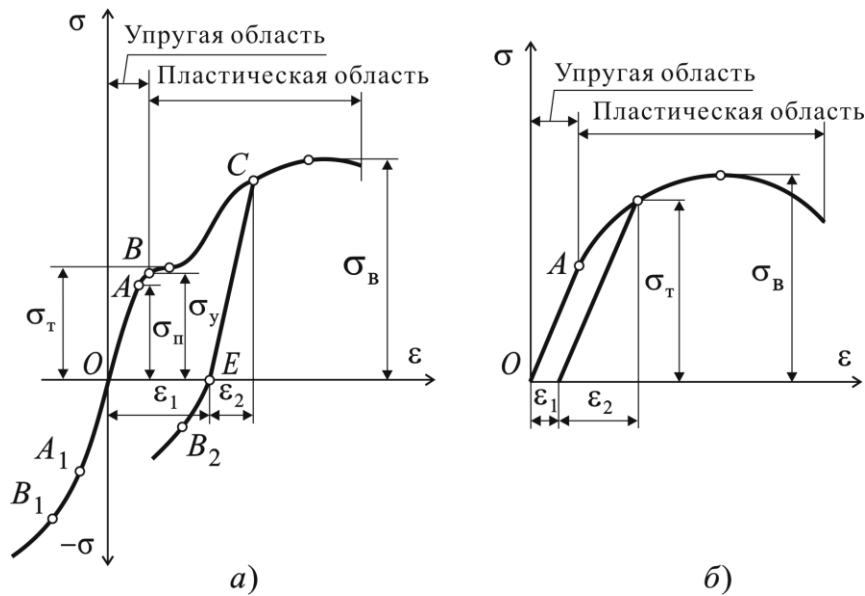


Рис. 3.2. Диаграммы зависимости напряжения от деформации:
 а – при растяжении; б – при сжатии

Этот участок характерен тем, что в пределах пропорциональности при нагрузке и разгрузке зависимость $\sigma(\varepsilon)$ изображается одной прямой A_1OA . Деформация материала в этих пределах является упругой, т.е. обратимой. При дальнейшем увеличении нагрузки зависимость $\sigma(\varepsilon)$ становится нелинейной: участок AB соответствует нагружению, а участок A_1B_1 – разгрузке. Однако при этом упругие свойства материала еще

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

сохраняются, т.к. при нагрузке и разгрузке зависимость $\sigma(\varepsilon)$ снова изображается одной кривой $OABOA_1B_1$.

Упругие обратимые свойства сохраняются до напряжения σ_y – предела упругости. Для многих материалов предел пропорциональности совпадает с пределом упругости, т.е. $\sigma_{II} = \sigma_y$. Для пластичных материалов, например, глинистых почв, диаграмма $\sigma(\varepsilon)$ после точки В может иметь горизонтальный участок, соответствующий пределу текучести σ_T , т.е. когда при постоянной нагрузке деформация увеличивается, говорят, что материал «течет».

При последующем увеличении нагрузки происходит некоторое увеличение напряжения (точка С). Участок BC часто называют участком упрочнения материала (этот термин, прежде всего, относится к мягким металлам).

Если в точке С снять нагрузку и довести напряжение до нуля $\sigma=0$, то окажется, что деформация не будет равна нулю. В точке E общая деформация будет состоять из двух частей: остаточной ε_1 и упругой ε_2 . Появление остаточной деформации характерно только для пластичных материалов.

При сжатии (рис. 3.2, б) почва не имеет ярко выраженной площадки текучести, поэтому за предел пропорциональности σ_{II} принимают условную точку A где отклонение от линейной зависимости $\sigma(\varepsilon)$ не превышает 1...3%. Предельное напряжение, которое выдерживает материал, а затем разрушается, называется временным сопротивлением σ_B .

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

На диаграмме $\sigma F(\varepsilon)$ (рис. 3.2, а) можно наблюдать так называемый эффект Баушингера [79], который выражается в снижении предела упругости при сжатии после предварительного растяжения за пределы упругости. Более наглядно эффект Баушингера показан на графике рис. 3.3. Из диаграммы следует, что если пластически деформируемый материал разгрузить, а затем подвергнуть нагружению в противоположном направлении, то его механическая характеристика изобразится новой диаграммой, причем $\sigma'_y < \sigma_y$. Пластическое растяжение материала вызывает уменьшение его предела упругости при непосредственно следующем за ним сжатии, и наоборот – пластическое сжатие вызывает уменьшение предела упругости при последующем растяжении. Часто эффектом Баушингера называют явление снижения предела текучести при повторной нагрузке, не совпадающей с направлением первоначальной нагрузки. Этот эффект также наблюдается при повторной нагрузке в том же направлении [115].

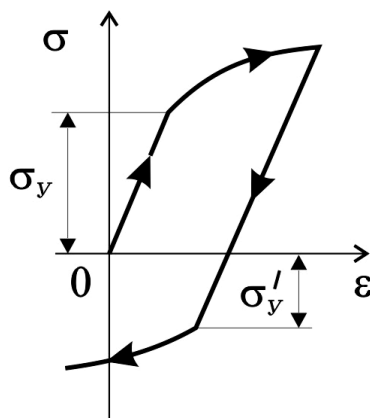


Рис. 3.3. График, иллюстрирующий эффект Баушингера

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Использование эффекта Баушингера на практике может дать значительное снижение энергоемкости при обработке почвы. Для этого необходимо применять рабочие органы разнонаправленного действия на пласт почвы.

Для примера на рис. 3.4, а показаны схемы действия на пласт почвы долот рыхлителя: плоского и S-образного долота с двойной кривизной поверхности (с минимальным углом крошения в начале, максимальным – в средней части и минимальным углом схода пласта в конце долота). Из схемы следует, что фигурное долото, по сравнению с плоским, может обеспечить разнонаправленное воздействие на пласт и, таким образом, снижение энергоемкости процесса.

Разнонаправленное воздействие на пласт почвы используется также в конструкции рабочего органа плуга-рыхлителя «Paraplow» (рис. 3.4, б).

Числовые данные по показателям прочности почвы в научной литературе приводятся довольно скупо. Ниже в табл. 3.1 даны значения модуля упругости E , предела пропорциональности $\sigma_{\text{п}}$ и временного сопротивления $\sigma_{\text{в}}$ полученные для среднесуглинистой почвы при различной влажности и твердости почвы.

Таблица 3.1

Значения E , $\sigma_{\text{п}}$ и $\sigma_{\text{в}}$ для средне суглинистой почвы
(по данным М.Д. Подскребко) [103]

Твердость в слое 0-20 см, МПа	Влажность в слое 0-20 см, %	E , кПа	$\sigma_{\text{п}}$, кПа	$\sigma_{\text{в}}$, кПа
1,4	21,7	14,9	2,0	7,3
2,1	17,3	17,5	3,6	6,3

По данным [62] предел прочности среднего суглинка при растяжении 5...6 кПа, при сжатии 65...108 кПа, при сдвиге 10...12 кПа.

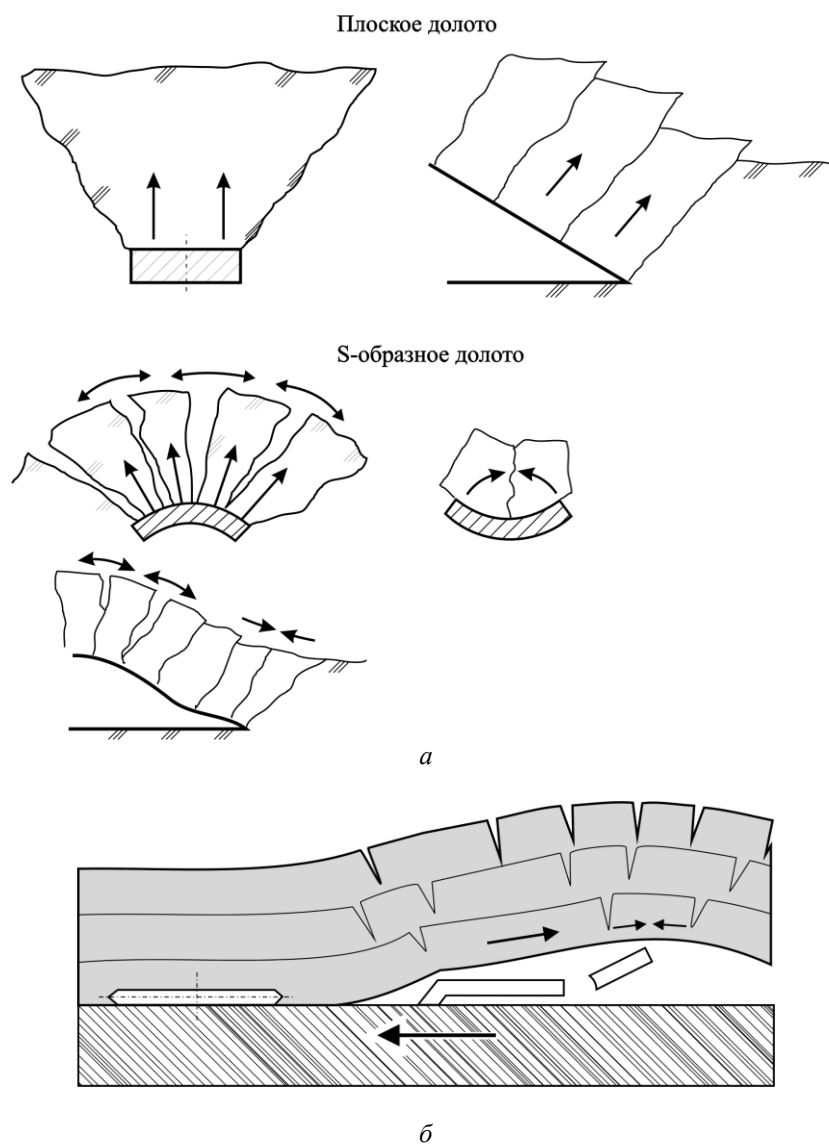


Рис. 3.4. Схема воздействия на пласт почвы:
a – плоского и S-образного долот рыхлителя;
б – наклонной пластины рабочего органа рыхлителя «Paraplow»

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

В.П. Горячкин [32] со ссылкой на Г. Гологурского [29] дает следующие значения критериев прочности почв: при растяжении $0,05 \dots 0,1 \text{ кгс/см}^2$; при сжатии $0,1 \dots 0,5 \text{ кгс/см}^2$; при кручении $0,1 \dots 0,5 \text{ кгс/см}^2$.

Подробно изучили сопротивление почвы различным деформациям Я.М. Жук и В.Ф. Рубин [44]. В их статье описана методика подготовки образцов почвы и аппаратура для определения сопротивления почвы различным деформациям. В качестве объекта лабораторных исследований были использованы образцы подпахотного горизонта мощного глинистого чернозема. Подготовка образцов для лабораторных исследований проводилась при влажности почвы $20 \dots 25\%$, что соответствовало их влажности в момент отбора в поле.

Временное сопротивление разрыву глинистого чернозема при различной влажности приведено в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Временное сопротивление разрыву образцов глинистого чернозема [44]

Влажность почвы, %	Для структурных образцов, гс/см^2		Для бесструктурных образцов, гс/см^2	
	Среднее	Пределы изменения	Среднее	Максимальное
5-8	-	-	3651	5191
6-9	806	693...941	3500	4860
9-10	1020	491...1666	1547	1708
10-13	1760	1215...2171	2781	2909
15-17	587	277...951	937	1369
17-19	194	121...274	750	1020
19-23	129	42...190	570	1290
23-26	82	64...124	358	715
27-30	87	37...163	558	558
30-33	78	22...139	199	219
34-37	49	40...59	-	-

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Из табл. 3.2 следует, что временное сопротивление разрыву с увеличением влажности значительно уменьшается, особенно резко начиная с влажности 19...20%. Временное сопротивление разрыву бесструктурных образцов при любой влажности намного выше, чем структурных образцов, что подтверждает влияние структуры почвы на ее прочность.

Временное сопротивление сдвигу и изгибу структурных и бесструктурных образцов почвы от влажности дано в табл. 3.3 [44].

Таблица 3.3

Временное сопротивление сдвигу и изгибу (средние значения) [44]

Влажность почвы, %	Временное сопротивление сдвигу, гс/см ²		Временное сопротивление изгибу, гс/см ²	
	Структурные образцы	Бесструктурные образцы	Структурные образцы	Бесструктурные образцы
6-8	5279	9475	4695	12870
8-10	5200	8595	5370	-
10-12	4955	-	4770	13090
12-15	3712	6695	-	-
15-17	2651	2802	2583	-
18-19	1735	2260	-	-
19-22	960	1802	1968	3800
22-25	172-1183	2158	827	2010
Свыше 25	499-5370	1262	-	-

Из данных табл. 3.3 следует, что в лабораторных условиях сопротивление сдвигу и изгибу мало изменяется в пределах влажности воздушно-сухого состояния до влажности 10-13%, резко падает при влажности 13-14% и продолжает уменьшаться при дальнейшем увеличении влажности. Бесструктурные образцы оказывают значительно большее сопротивление сдвигу и изгибу, т.е. наблюдается та же закономерность, что и при разрыве.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Если построить графическую зависимость сопротивления разрыву, сдвигу и изгибу от влажности почвы, то можно заметить, что сопротивление изгибу значительно превышает сопротивление разрыву и близко по абсолютной величине сопротивлению сдвига (рис. 3.5).

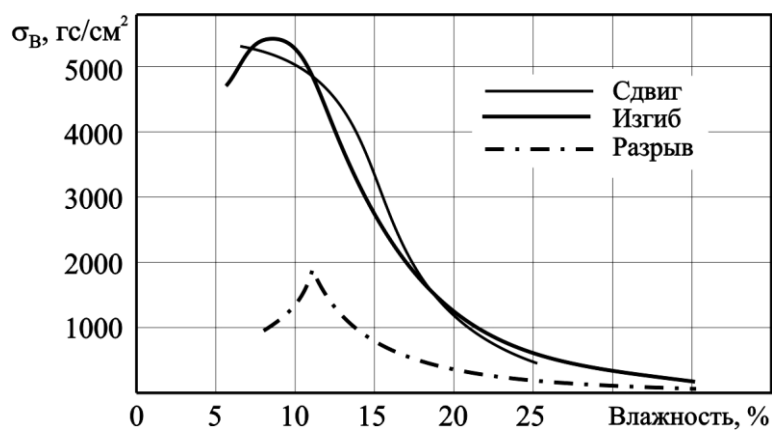


Рис. 3.5. Зависимость временного сопротивления разрыву, сдвигу и изгибу от влажности почвы (лабораторные опыты)

Для проверки результатов лабораторных опытов были проведены полевые опыты. Образцы формировались из монолитов почвы подпахотного слоя с ненарушенной структурой. У всех образцов, сечения, по которым проходила деформация, находились на глубине 25-30 см. Исключением были образцы, подвергавшиеся изгибу, сечения разрушения которых находились на глубине 40 см.

Итоговые данные по абсолютной величине временного сопротивления почвы на сжатие, разрыв, изгиб и сдвиг приведены в табл. 3.4.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Таблица 3.4

Средние значения временного сопротивления разрыву, сжатию, сдвигу и изгибу глинистого чернозема [44]

Разрыв		Сжатие		Сдвиг		Изгиб	
Влажность почвы, %	σ_B , гс/см ²	Влажность почвы, %	σ_B , гс/см ²	Влажность почвы, %	σ_B , гс/см ²	Влажность почвы, %	σ_B , гс/см ²
21-23	61,8	12-16	1080	15-17	122,1	15-17	488
23-25	52,5	19-22	980	20-24	98,6	15-17	-
26-28	50,0	22-24	650	20-24	-	-	-

Из данных табл. 3.4 следует, что сопротивление разрыву, сжатию и сдвигу уменьшается с повышением влажности почвы. Сопротивление деформации сжатия требует наибольшего усилия, а деформации разрыва – наименьшего. Сопротивление деформации изгиба значительно больше, чем сопротивление сдвигу. Если принять сопротивление разрыву почвы за 1, то сопротивление деформациям сжатия, сдвига и изгиба будут соответственно равны 13, 2 и 10, т.е. временное сопротивление сжатию почти в 13...20 раз больше, чем временное сопротивление разрыву, и в 2...3 раза больше сопротивления сдвигу.

Степень и величина напряженно-деформированного состояния почвы под воздействием рабочих органов, прежде всего, зависит от ее физико-механического состояния: дисперсности, механического и гранулометрического состава, влажности, а также структурности. Структурные почвы при всех видах деформаций имеют меньшее временное сопротивление, чем бесструктурные.

Из изложенного следует, что наиболее рациональным при обработке почвы является использование деформаций растяжения и сдвига. Впервые способ деформации пласта растяжением и его техническая реализация были предложены Д.Г. Виленским и А.Д. Афанасьевым [25]. Пласт почвы защемляется между двумя

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

вертикально установленными дисками, при перекачивании которых пласт отрывается от дна борозды и чистиком принудительно выталкивается обратно в борозду. Этот способ не получил дальнейшего развития, т.к. не обеспечивал достаточного крошения почвы и оборота пласта. Кроме того, для заглубления дисков требовалась значительная вертикальная нагрузка. Предложенное устройство может найти применение при образовании небольших канав и каналов.

Подобная попытка использовать для обработки почвы деформации растяжения была предпринята в Великобритании [144]. Экспериментальная установка состояла из двух плоских дисков, наклоненных друг к другу в горизонтальной и вертикальной плоскостях так, что расстояние между верхними передними кромками дисков было больше, чем между нижними задними. При движении дисков в почве, пласт защемлялся между ними, отрывался от дна борозды, поднимался незначительно вверх и укладывался обратно в борозду в разрыхленном состоянии. Схема установки дисков показана на рис. 3.6. При диаметре дисков $D=850$ мм, углах наклона α и β от 4° до 9° и расстоянии между дисками $S=300\dots500$ мм рыхление почвы было достаточно эффективным при глубине обработки $z=25$ см.

При испытаниях установки тяговое сопротивление было значительно меньше, чем у рыхлителей с зубовыми рабочими органами. Однако, как и в установке Д.Г. Виленского, для заглубления дисков требовались значительные вертикальные нагрузки.

Значительную долю растягивающих деформаций создает рабочий орган отечественного плуга-рыхлителя ПРН (рис. 3.7). Благодаря отклоненной от вертикального положения криволинейной стойке отрезаемый пласт несколько поднимается и изгибается, и в нем создаются растягивающие напряжения.

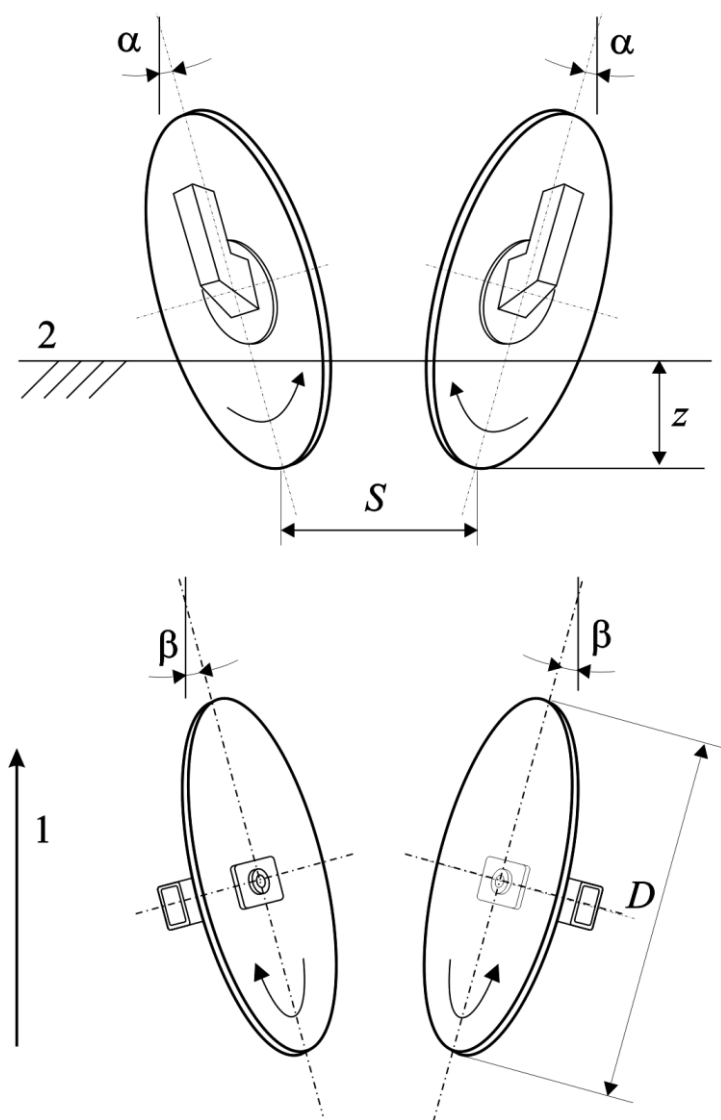


Рис. 3.6. Дискový рыхлитель, обеспечивающий растягивающие деформации: 1 – направление движения; 2 – поверхность почвы

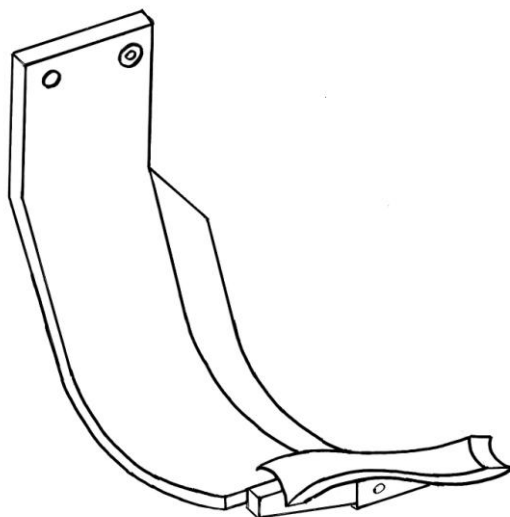


Рис. 3.7. Рабочий орган чизельного плуга-рыхлителя типа ПРН

По сравнению с вертикальной прямой стойкой такой рабочий орган способен обеспечить снижение тягового сопротивления на 10...20% при лучшем крошении почвы.

Значительную долю растягивающих деформаций можно получить в результате газодинамического эффекта, когда разрушение почвы производится энергией расширяющихся газовоздушных потоков. Газодинамические интенсификаторы рыхления грунтов впервые были использованы в землеройных машинах [9].

Взрывообразное истечение продуктов сгорания через отверстия, например, в ноже бульдозера или глубокорыхлителя воздействует растягивающим образом на почвогрунт, разрушает и перемещает его (Авт. свид. СССР 253672 и 929788, пат. США 3685592). Отметим особенности разрушения почвогрунта расширяющимся газом [149]. При внедрении механического рабочего органа в грунт (рис. 3.8), в нем образуются

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

множество трещин, которые служат концентраторами напряжений при последующем динамическом расширении газа. Внедряясь в трещину газ действует как клин. Раскрытие трещины происходит в основном в сторону дневной поверхности, поэтому пласт разрушается преимущественно от деформации разрыва.

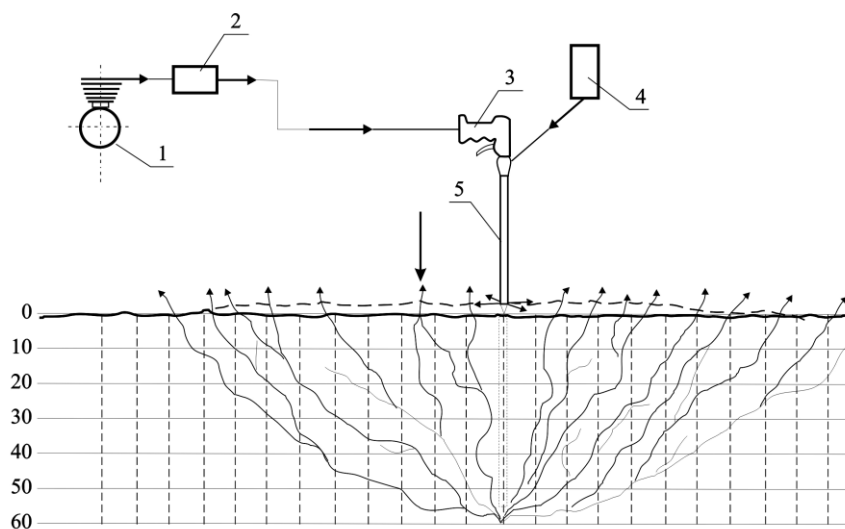


Рис. 3.8. Пневматический способ рыхления почвы

Воздух компрессором 1 подается в ресивер 2, пневмопровод соединен с краном 3, управляемым вручную или автоматически. При внедрении инжектора 5 на заданную глубину открывается клапан, воздух под давлением поступает в почву и рыхлит ее. Из бака 4 могут подаваться минеральные жидкие удобрения или структурообразующие вещества.

При воздействии рабочих органов почвообрабатывающих машин почва испытывает различные виды деформации: сжатие, растяжение, сдвиг, кручение и более сложное деформированное состояние, представляющее сочетание простых видов деформации. Рассмотрим подробно некоторые закономерности деформации сжатия и сдвига почвы.

3.3. Сопротивление почв сжатию

Деформация сжатия складывается из обжатия и разрушения структурных агрегатов, изменения их взаимного расположения и расстояний между ними, выжимания свободной воды и воздуха из пор. В зависимости от величины напряжения, деформация почвы при сжатии может быть упругой (обратимой) и пластической (необратимой). Сжатие может происходить при свободном боковом расширении или невозможности бокового расширения. Величина бокового давления характеризуется коэффициентом бокового давления

$$\xi = \frac{dq}{dp}, \quad (3.2)$$

где dq – приращение бокового давления;

dp – приращение сжимающего усилия.

При свободном боковом расширении относительное сжатие Δ' определяется через относительное расширение

$$\Delta'' = \mu \Delta', \quad (3.3)$$

где μ - коэффициент Пуассона.

Коэффициент Пуассона и коэффициент бокового давления связаны зависимостями

$$\mu = \frac{\xi}{1 + \xi} \text{ или } \xi = \mu(1 - \mu). \quad (3.4)$$

Используя коэффициент Пуассона можно в пределах пропорциональности определить относительную объемную деформацию образца

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$\Delta V = \frac{V_1 - V}{V} = \xi(1 - 2\mu), \quad (3.5)$$

где V_1 и V – начальный и конечный объемы.

В пределах $0 < \mu < 0,5$ сжатие приводит к уменьшению, а растяжение – к увеличению объема испытываемого образца, при $\mu = 0,5$ объемная деформация равна нулю.

Значения коэффициентов ξ и μ для некоторых типов почвогрунтов приведены в табл. 3.5 [6].

Таблица 3.5

Значения коэффициентов ξ и μ для некоторых типов почвогрунтов

Наименование почвогрунта	ξ	μ
Песок	0,40	0,30
Суглинок	0,60	0,35
Глина	0,70	0,42
Торфяник влажностью 78-85%	0,43	-

Сжимаемость почвогрунтов при невозможности бокового расширения определяют в лабораторных условиях, устанавливая зависимость между коэффициентом пористости n_p и давлением, по которой можно найти величину остаточной и упругой деформации (рис. 3.9).

Из графика рис. 3.9 следует, что деформация сжатия полидисперсных трехфазных почвогрунтов имеет нелинейный характер, закон Гука применим к почвогрунтам только в пределах малых изменений давления (в пределах пропорциональности).

Обобщенной характеристикой полидисперсных сред в механике грунтов принят модуль деформации E_ϕ , который в отличие от модуля

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

упругости (модуля Юнга E) комплексно отражает и упругие, и пластические свойства.

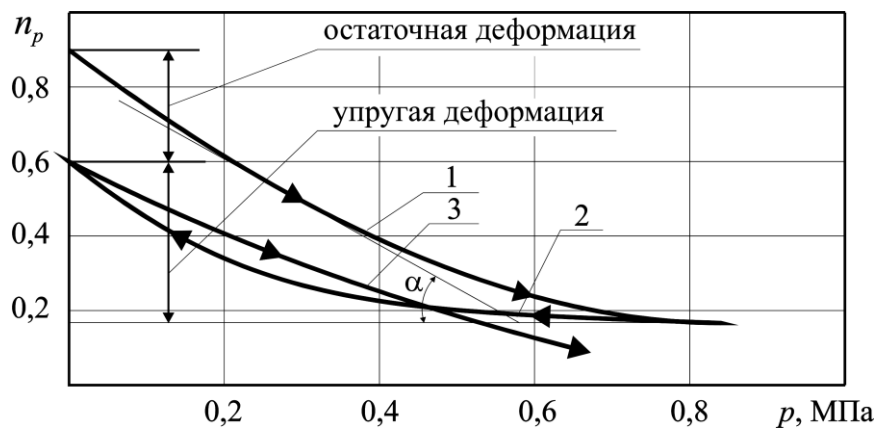


Рис. 3.9. Компрессионная кривая сжатия почвы:
1 – первичное сжатие; 2 – разгрузка; 3 – повторное сжатие

На небольшом участке компрессионной функции криволинейную зависимость между деформацией и нагрузкой можно заменить прямой линией, угловой коэффициент которой выразится

$$k' = \operatorname{tg} \alpha = (n_{p_1} - n_{p_2})(p_2 - p_1), \quad (3.6)$$

где k' - коэффициент уплотнения, $\text{м}^2/\text{Н}$;

n_{p_1} и n_{p_2} - коэффициенты пористости соответственно при давлениях p_1 и p_2 .

Используя компрессионную кривую, модуль деформации определяется из соотношения:

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$E_o = \frac{1}{k'}. \quad (3.7)$$

Рассмотренные два вида сжатия почвы (с возможностью бокового расширения или без нее) являются предельными случаями. В действительности сжатие почвы рабочими органами почвообрабатывающих машин является комбинацией этих двух предельных случаев. Общим случаем является сжатие с ограниченными возможностями бокового расширения. Например, работа плужного лемеха с открытой стенкой борозды, полусвободное резание почвы узким ножом или долотом. Рабочие органы щелерезов намеренно проектируются из условия блокирования бокового расширения.

Как показано выше, в основе процесса разрушения почвы лежит деформация сжатия. Диаграмма резания почвы (рис. 3.10) характеризуется резким подъемом усилия P на коротком пути – зона упругой деформации, затем резание идет при постоянном усилии – зона пластической деформации, резание при этом сопровождается образованием трещин скалывания (сдвига) впереди и по бокам передвигающегося клина.

При образовании трещин и тел скольжения (стружки) усилие резко падает.

Картина физических процессов, сопровождающих резание почвы клинообразным рабочим органом во многом аналогична картине деформации при вдавливании в почву твердого штампа. Диаграмме резания почвы клином $P = f(l)$ (рис. 3.10) можно сопоставить диаграмму $P = f(h)$ статического вдавливания наконечника твердомера - штампа (рис. 3.11).

Рассмотрим более подробно фазы, определяющие зависимость между давлением и осадкой штампа (рис. 3.11).

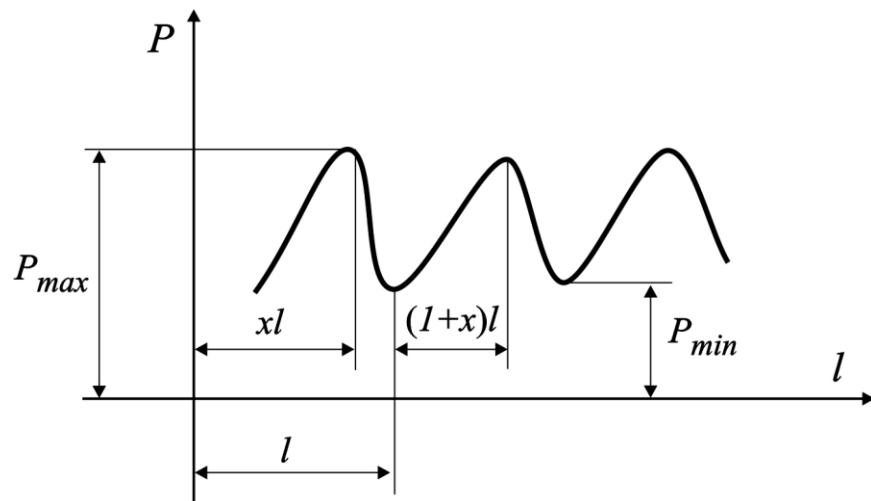


Рис. 3.10. Диаграмма усилия при резании почвы клином

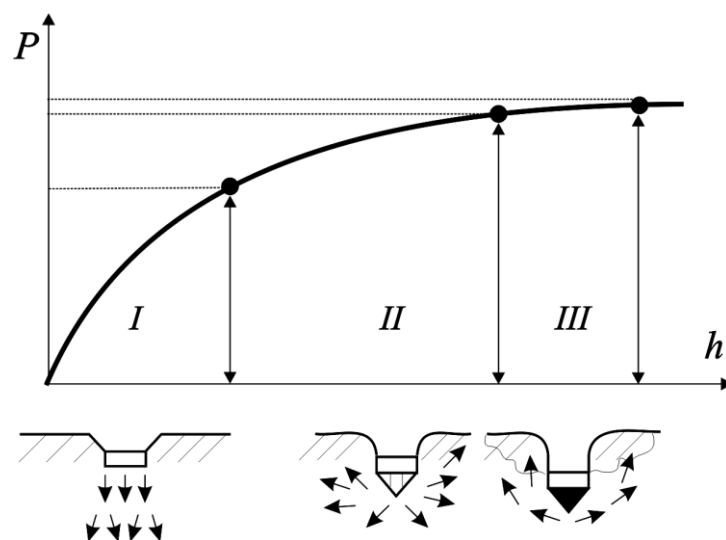


Рис. 3.11. Фазы давления и осадки грунта под штампом
(по Н.М. Герсванову) [28]

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Опыты по вертикальному вдавливанию штампов в грунт показывают, что усилие вдавливания зависит в основном от объемной деформации сжатия [98]. На графике можно выделить три характерных участка, соответствующих трем фазам напряженно-деформированного состояния почвогрунта. В фазе I происходит уплотнение почвогрунта: структурные агрегаты, сближаясь, опускаются вниз, вытесняя из пор водно-воздушную смесь. Происходит интенсивный рост сопротивления. В фазе I вертикальные перемещения частиц преобладают над горизонтальными. По мере дальнейшего движения штампа заканчивается формирование уплотненного ядра под штампом, которое приобретает конусообразную форму. Траектория частиц, лежащих под уплотненным ядром, все более отклоняется от вертикали: они начинают двигаться в горизонтальном направлении – наступает фаза II сдвигов почвы. При сдвиге частицы сначала выходят на свободную поверхность почвы, а затем, с увеличением глубины погружения штампа, выдавливаются в стенки массива грунта. В фазе II сопротивление вдавливанию штампа продолжает возрастать. Однако из-за возникновения сдвигов (выпирания почвы из-под штампа) интенсивность роста сопротивления падает и становится минимальной после стабилизации зоны сдвигов. После этого начинается фаза III, которая характеризуется установившимся движением частиц, при котором сопротивление растет с постоянной интенсивностью. Эта фаза соответствует образованию под штампом зоны устойчивого уплотненного ядра и области наступления предельного равновесия.

Для определения сопротивления грунта деформации в механике грунтов пользуются рядом «расчетных моделей», схематизирующих зависимость между нагрузкой и осадкой грунта. Для уплотняющих рабочих органов почвообрабатывающих машин наиболее подходящими могут быть следующие две модели (рис. 3.12) [133].

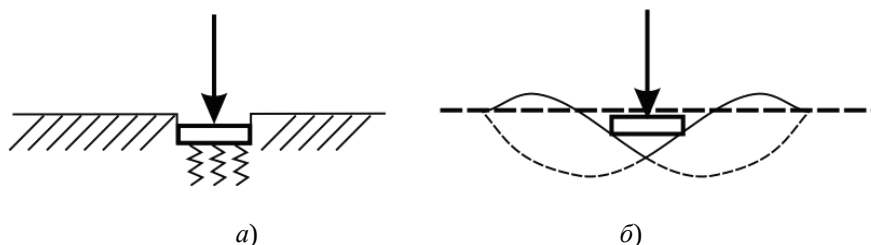


Рис. 3.12. Расчетные модели грунта под осадкой

Модель по гипотезе Фусса-Винклера (рис. 3.12, а) рассматривает грунт как систему не связанных между собой пружин, опирающихся на жесткое основание, сжатие которых возрастает прямо пропорционально приложенной нагрузке, т.е. $P = cz$, где c – жесткость пружин; z – сжатие. Сопротивление грунта развивается только непосредственно под штампом – грунт, расположенный сбоку, осадки не испытывает.

Вторая модель (рис. 3.12, б) основана на развитии в грунте зон пластических деформаций и оценивается расчетной схемой полупространства, находящегося в условиях предельного равновесия, когда под нагрузкой грунт перешел в пластическое состояние и сформировался упругий подштамповый клин, которым при осадке распирает грунт в стороны и выдавливает в сторону дневной поверхности.

Одним из предельных случаев напряженного состояния почвы при нагрузке штампом малой площади является действие сосредоточенной силы. Эта задача для линейно деформируемого полупространства была решена Ж. Буссинеском [133]

$$\sigma_R = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi R^2} \cos \beta, \quad (3.8)$$

где σ_R – напряжение в радиальном направлении;

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

R - расстояние от точки приложения нагрузки до рассматриваемой точки в толще почвы;

β - соответствующий центральный угол.

Из уравнения (3.8) следует, что радиальные напряжения обратно пропорциональны квадрату расстояния от точки приложения нагрузки и прямо пропорциональны косинусу центрального угла рассматриваемой точки в толще почвы. Это уравнение Ж. Буссинеска справедливо для всех почвогрунтов в пределах пропорциональности напряжений от деформации, т.е. в пределах закона Гука.

Если отнести величину напряжений не к площадке, перпендикулярной радиусу, а к площадке параллельной к ограничивающей плоскости и составляющей с ней угол β (рис. 3.13), то уравнение для σ_z будет иметь вид

$$\sigma_z = k \frac{P}{z^2}, \quad (3.9)$$

$$\text{где } k = \frac{3}{2\pi \left[1 - \left(\frac{r}{z} \right)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}.$$

Значение безразмерного коэффициента k даны в книге Н.А. Цытовича [133] (с. 150, табл. 9).

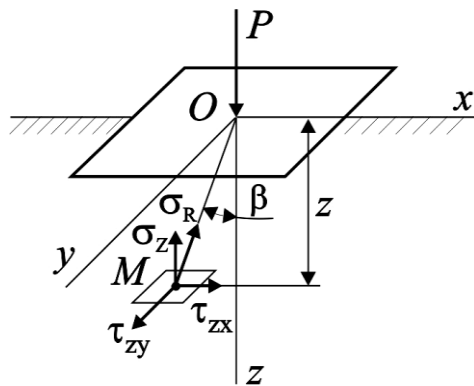


Рис. 3.13. Составляющие напряжений для площадки, параллельной ограничивающей плоскости

При действии на поверхность полупространства круглым жестким штампом напряжение по оси Oz рассчитывается по уравнению [134]

$$\sigma_z = p \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \left[\frac{a}{z} \right]^2} \right\} = pk', \quad (3.10)$$

где $p = \frac{4P}{\pi d^2}$ – среднее давление на единицу площади, Па;

d – диаметр штампа, м; $a \leq \frac{d}{2}$.

Значения коэффициента k' даны в табл. 5.10 [134].

Для примера построим эпюры напряжений для сосредоточенной силы $P=0,5$ кН, приложенной к полубесконечному полупространству.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Результаты вычислений сжимающих напряжений σ_z для сечений на глубине $z_1=0,1$ м и $z_2=0,2$ м и для горизонтальных площадок по вертикальной оси приведены на рис. 3.14.

Из выражения (3.10) следует, что в точке приложения сосредоточенной силы получаются бесконечно большие напряжения, которые превосходят предел прочности почвы. Это не соответствует действительности, следовательно, в данной области формула (3.10) недействительна и для вычисления напряжений следует использовать положения теории пластичности.

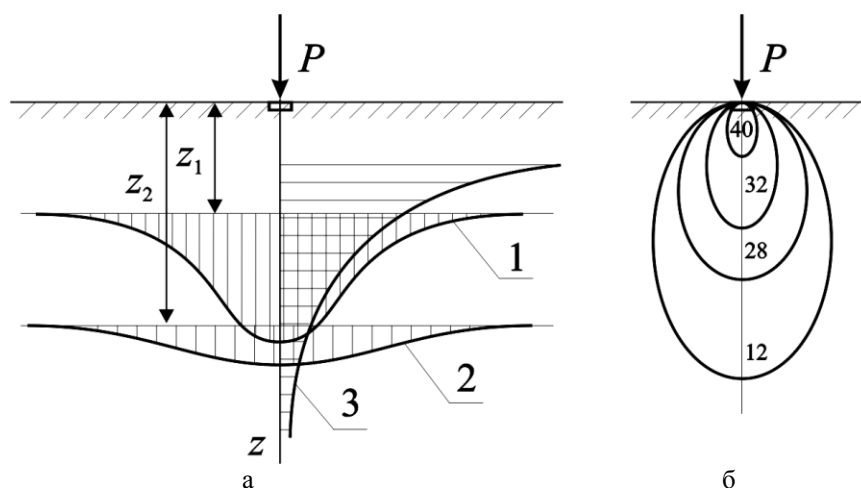


Рис. 3.14. Эпюры сжимающих напряжений в почве при действии сосредоточенной силы:
а) 1- глубина $z_1=0,1$ м; 2 - $z_2=0,2$ м; 3 - по вертикальной оси;
б) линии одинаковых давлений (изобары)

3.3.1. Условия предельного равновесия

При значительном развитии зон пластических деформаций в почвогрунте и переходе к III фазе Н.М. Герсеванов [28] предложил оценить деформации расчетной схемой полупространства, находящегося в условиях предельного равновесия.

Наглядное представление о напряженном состоянии почвогрунтового полупространства можно получить не только по эпюрам напряжений, но и по линиям равных напряжений (изобар).

Напряжения, возникающие в почве от внешних нагрузок, обуславливают характер ее деформации в зависимости от физико-механического состояния. Выше были рассмотрены три фазы деформаций, протекающие в полупространстве почвы под жестким штампом при постепенно возрастающей, равномерно распределенной нагрузке. В фазе I (рис. 3.11) напряжения от внешней нагрузки, если они больше прочности на сжатие, вызывают лишь смещения (сдвиги) отдельных твердых частиц и агрегатов относительно друг друга. Фаза I может быть названа фазой уплотнения [133], т.к. в таком состоянии почвогрунты приобретают более плотную структуру. Зависимость между общей деформацией и сжимающим напряжением в этой фазе с достаточной точностью можно принять линейной.

В конце фазы I и начале фазы II вследствие концентрации напряжений и в результате сдвигов частиц формируются отдельные площадки скольжения, по которым касательные напряжения уже превышают предельное сопротивление почвы сдвигу.

При дальнейшем увеличении нагрузки наступает фаза II – сдвигов, переходящих в пластическое течение: происходит выпирание, т.е.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

наступает предел несущей способности почвогрунта. Зависимость между деформацией и напряжением в этой фазе нелинейная.

В процессе образования в почвогрунте зон пластических деформаций, во время фазы II, непосредственно под опорной плоскостью штампа формируется уплотненное ядро ABC . В дальнейшем ядро как клин раздвигает почву в стороны, под штампом образуются сплошные поверхности скольжения, и происходит выдавливание почвы с выпиранием ее вверх (фаза III). При этом вокруг ядра образуются выпирающие из-под штампа валы почвы BCD и ACE – призмы выпирания. Для определения прочности почвенного массива с боковым выпиранием среды используют схему предельного равновесия (рис. 3.15) [6].

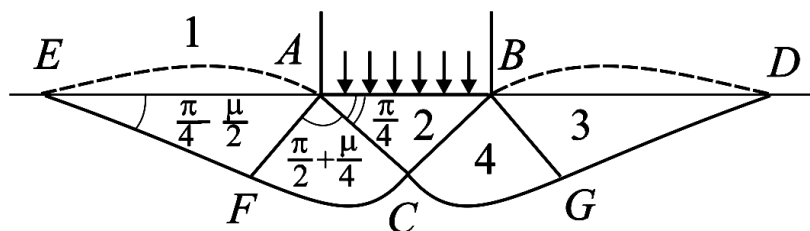


Рис. 3.15. Схема пластической деформации почвогрунта под действием штампа в условиях предельного равновесия:

- 1 – линия выпирания почвы; 2 – конус уплотненного ядра почвы;
- 3 – призма пассивного отпора; 4 – зона пластического течения

Вдавлению штампа в почвогрунт препятствуют силы сопротивления сдвигу, возникающие на поверхности уплотненного ядра под штампом. Внутри призм волочения имеет место упругое напряженное состояние, а в переходных зонах BCG и ACF – пластическое течение почвы [6]. При пластическом течении даже незначительное увеличение

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

нагрузки приводит к потере прочности почвогрунта. Этот момент наступает после превышения действующими нормальными напряжениями σ такой величины, когда оно станет больше предельно допустимого для данного почвогрунта касательного напряжения τ , т.е.

$$\sigma \operatorname{tg} \varphi_B + c > |\tau|. \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) выражает закон прочности Кулона-Мора для связных почвогрунтов (см. ниже), обладающих внутренним трением и сцеплением. Оно может быть распространено для большинства видов супесчаных и глинистых почвогрунтов, причем для идеально сыпучих почв (при $c=0$) $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi_B$, для идеально связных ($\varphi_B=0$) $\tau = c$ [134].

Математическое выражение для определения соотношений между предельными напряжениями могут быть получены при помощи кругов Мора, которые выражают зависимость между напряжениями в любой точке нагруженного массива почвы. Определив, например, на приборе трехосного сжатия (стабиломере) действующие вертикальные σ_z и боковые σ_x напряжения в момент разрушения, рассчитывают предельные главные напряжения σ_1 и σ_3 .

По значениям σ_1 и σ_3 строят предельный круг Мора при данном напряженном состоянии. При другом предельном напряженном состоянии строят второй предельный круг Мора и т.д. Построив семейство таких кругов и их общую огибающую, получают диаграмму предельного равновесия.

Рассмотрим физические процессы, происходящие при медленном погружении в почву плоского круглого штампа (рис. 3.16).

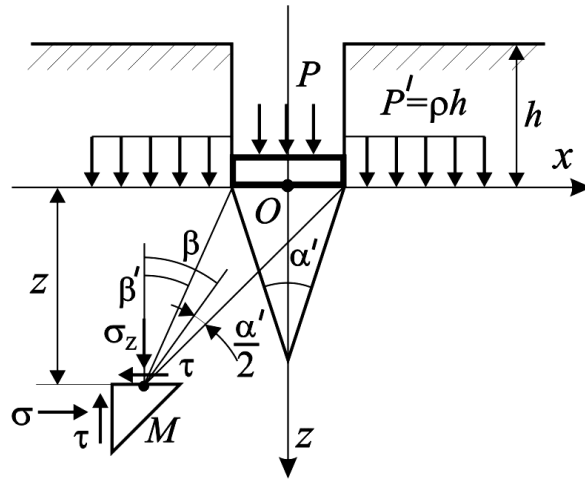


Рис. 3.16. Схема действующих нагрузок при вдавливании в почву плоского штампа

Задача определения напряжений для случая равномерно распределенной нагрузки решена Фламеном [75]. Расчетную плоскость, ограничивающую полупространство, расположим на глубине h . Вес слоя почвы толщиной h заменим равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью $P' = \rho h$. Вертикальное нормальное напряжение от веса почвы в точке с координатой z будет равно $\sigma_z = \rho(h + z)$. Тогда в любой произвольно взятой точке M , определяемой «углом видимости» α (образованным прямыми, соединяющим рассматриваемую точку с краями штампа) и координатой z , суммарные главные напряжения будут равны

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{P - \rho h}{\pi} (\alpha' + \sin \alpha' \cos^2 \beta) + \rho(h + z); \\ \sigma_3 &= \frac{P - \rho h}{\pi} (\alpha' - \sin \alpha' \cos^2 \beta) + \rho(h + z) \end{aligned} \right\}, \quad (3.12)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

где P – интенсивность распределенной нагрузки на штамп, Н/см²;

ρ – плотность почвы, кг/см³; h – глубина вдавливания штампа, см;

α' – угол видимости штампа из рассматриваемой точки;

β' – угол, составленный левым крайним лучом с вертикалью;

$$\beta = \beta' + \frac{\alpha'}{2}.$$

Для точек, находящихся под штампом на оси Oz , имеем $\beta = 0$ и

$\beta' = \frac{\alpha}{2}$. Тогда уравнения (3.12) примут вид

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_z &= \frac{P - \rho h}{\pi} (\alpha' + \sin \alpha') + \rho(h + z); \\ \sigma_3 = \sigma_y &= \frac{P - \rho h}{\pi} (\alpha' - \sin \alpha') + \rho(h + z) \end{aligned} \right\}. \quad (3.13)$$

Подставив выражение главных напряжений (3.13) в уравнение

предельного состояния $\sin \varphi_B = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \operatorname{tg} \varphi_B + \sigma_1 + \sigma_3}$ и решив его

относительно z , получим

$$z = \frac{P - \rho h}{\pi \rho} \left(\frac{\sin \alpha' - \alpha}{\sin \varphi_B} \right) = \frac{c}{\rho} \operatorname{tg} \varphi_B - h. \quad (3.14)$$

Последнее выражение показывает, на какой глубине наступит предельное равновесие от нагрузки P .

Определим максимальную глубину $z_{\max}$ распространения областей предельного равновесия. Для этого возьмем первую производную от z по α' уравнения (3.14) и приравняем ее нулю:

$$\frac{dz}{d\alpha'} = \frac{P - \rho h}{\pi \rho} \left(\frac{\cos \alpha'}{\cos \varphi_B} - 1 \right) = 0,$$

откуда $\cos \alpha' = \sin \varphi_B$ или согласно тригонометрическим функциям приведения

$$\alpha' = \frac{\pi}{2} - \varphi_B. \quad (3.15)$$

Из этого уравнения следует, что угол при вершине уплотненного ядра под штампом зависит от угла внутреннего трения почвы.

Подставив выражение угла α' в уравнение (3.14) и учитывая, что

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_B\right) = \cos \varphi_B, \text{ получим}$$

$$z_{\max} = \frac{P - \rho h}{\pi \rho} \left(c \operatorname{tg} \varphi_B + \varphi_B - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{c}{\rho} c \operatorname{tg} \varphi_B - h. \quad (3.16)$$

Выражение (3.16) показывает, что при действии равномерно распределенной нагрузки P область предельного равновесия распространится на глубину $z_{\max}$, а нижняя точка этой области определится углом видимости α' .

Из выражения (3.16) можно найти ту нагрузку, которая вызывает распространение области предельного равновесия на заданную глубину $z_{\max}$. Эта нагрузка, называемая критической, равна

$$P_{KP} = \frac{\pi}{c \operatorname{tg} \varphi_B + \varphi_B - \frac{\pi}{2}} (\rho z_{\max} + \rho h + c \operatorname{tg} \varphi_B) + \rho h. \quad (3.17)$$

Если в выражение (3.17) подставить значение $z_{\max} = 0$, то получим первую критическую нагрузку, при которой ни в одной точке полупространства почвогрунта не наступит предельное равновесие

$$P_{KP1} = \frac{\pi \rho h + c \operatorname{tg} \varphi_B + \rho h}{c \operatorname{tg} \varphi_B + \varphi_B - \frac{\pi}{2}}. \quad (3.18)$$

Вторая критическая нагрузка – это предельная нагрузка, при которой полностью исчерпывается несущая способность почвогрунта, что достигается при окончании формирования уплотненного ядра под штампом.

Решение дифференциальных уравнений равновесия совместно с условиями предельного равновесия позволяет найти нагрузку, соответствующую полной потере несущей способности грунта. Эта задача впервые была решена Прандтлем и Рейсмером для невесомого грунта [133]

$$P_{KP2} = (\rho h + c \operatorname{tg} \varphi_B) \frac{1 + \sin \varphi_B}{1 - \sin \varphi_B} e^{\pi \operatorname{tg} \varphi} - c c \operatorname{tg} \varphi_B. \quad (3.19)$$

Максимальное сопротивление почвы достигается при погружении штампа на глубину $z_{\max}$, при которой формируется так называемая «луковица напряжений» (рис. 3.17).

Необходимо отметить, что подобная картина возникает не только при вдавливании деформатора перпендикулярно поверхности почвы, но и при работе щелерезов в виде вертикальных ножей, а также перед наклонными в поперечном направлении ножами ниже критической глубины. Этим объясняется практический интерес к моделям рассматриваемых явлений.

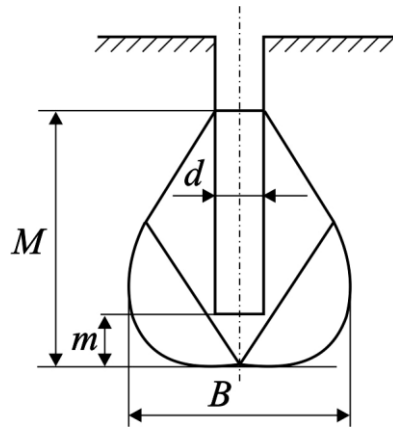


Рис. 3.17. Размеры «луковицы напряжений» под штампом

Основные размеры «луковицы напряжений» определяются по формулам:

$$m = \frac{d}{2} \frac{\cos \varphi_B}{\cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_B}{2}\right)} \exp\left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_B}{2}\right) \operatorname{tg} \varphi_B\right]; \quad (3.20)$$

$$M = d \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_B}{2}\right) \exp\left[\pi \operatorname{tg} \varphi_B + \frac{\cos \varphi_B}{\cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_B}{2}\right)}\right]; \quad (3.21)$$

$$B = d \left\{ 1 + \frac{\cos \varphi_B}{\cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_B}{2}\right)} \exp\left[\frac{3}{4} \pi + \operatorname{tg} \varphi_B\right] \right\}. \quad (3.22)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Для образования «луковицы напряжений» штамп должен погрузиться на глубину

$$z_{\max} = M - md \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_B}{2}\right) \exp[\pi \operatorname{tg} \varphi_B]. \quad (3.23)$$

Определим первую P_{KP1} и вторую P_{KP2} критические нагрузки и соответствующие величины погружения z штампа для следующих исходных данных: $c=5 \text{ Н/см}^2$; $\rho=0,015 \text{ кг/см}^3$; $\varphi_B=30^\circ$. Результаты расчетов по уравнениям (3.18) и (3.19) приведены на графике рис. 3.18.

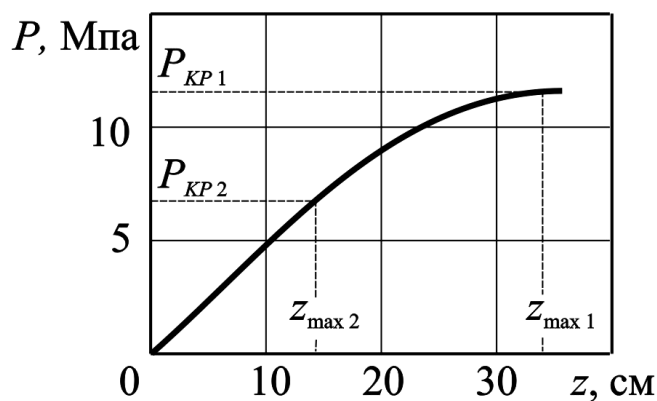


Рис. 3.18. Зависимость критической нагрузки от глубины вдавливания штампа

Из графика следует, что при сжатии почвы штампом, нагрузка возрастает по нелинейной зависимости. Как только под штампом образовалось уплотненное ядро, возникает устойчивое пластическое течение и сжимающее усилие при погружении штампа не увеличивается, а удельное давление достигает величины P_{KP2} предела несущей способности почвы. В начальной стадии диаграммы сжатия (рис. 3.18)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

имеется участок, где наблюдается прямо пропорциональная зависимость между удельным давлением и осадкой штампа, т.е.

$$p = k'z, \quad (3.24)$$

где k' - коэффициент объемного смятия почвы, кг/м³.

При дальнейшем погружении штампа прямо пропорциональная зависимость нарушается: рост давления отстает от роста деформации и согласно степенной функции

$$p = k''z^n, \quad (3.25)$$

где k'' - константа; n – показатель степени деформируемости почвы.

В.В. Кацыгин [54] предложил зависимость между напряжением σ и деформацией z выражать функцией гиперболического тангенса

$$\sigma = p_0 \operatorname{th} \frac{k}{p_0} z, \quad (3.26)$$

где σ - напряжение сжатия (смятия) почвы, Н/см²;

p_0 – предел несущей способности почвы, Н/см²;

k – коэффициент объемного смятия, Н/см³.

Значения коэффициентов p_0 и k приведены в табл. 3.6.

Зависимость (3.26) хорошо согласуется с экспериментальными данными по определению твердости почвы, т.к. кривые $p = f(z)$, записанные твердомером, отображают фазы формирования и перемещения уплотненного ядра.

На рис. 3.19 представлены практические диаграммы твердости почвы, полученные твердомером с наконечниками разной формы [122].

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Таблица 3.6

Значения коэффициентов p_0 и k

Тип почвы по механическому составу	Фон	Влажность, %	Несущая способность p_0 , МПа	Коэффициент объемного смятия, Н/см ³
Супесь	Целина	14-16	1,43-2,29	83-110
	Стерня зерновых	11-13	0,81-0,9	68-82
	Слежавшаяся пахота	12-14	0,45-0,66	41-65
Легкий суглинок	Целина	13-14	2,42-2,58	136-166
	Стерня зерновых	12-13	1,43-2,09	109-174
	Слежавшаяся пахота	12-13	0,96-1,16	73-94
Средний суглинок	Целина	10-11	2,74-3,1	111-199
	Стерня зерновых	12-14	1,68-2,27	104-107
	Слежавшаяся пахота	16-17	0,68-1,09	61-108
Тяжелый суглинок	Целина	19-20	2,49-2,85	116-182
	Стерня зерновых	13-16	1,88-2,47	98-174
	Слежавшаяся пахота	12-14	1,28-2,95	73-106
Глина	Целина	12-15	2,23-4,62	127-207
	Слежавшаяся пахота	10-13	1,91-2,29	83-147

При экспериментальном определении характеристик почвы выбор формы наконечника зависит от средней твердости почвы. Конический наконечник применяется для твердых целинных почв, цилиндрический и эллипсоидальный – для вспаханных почв, перед культивацией.

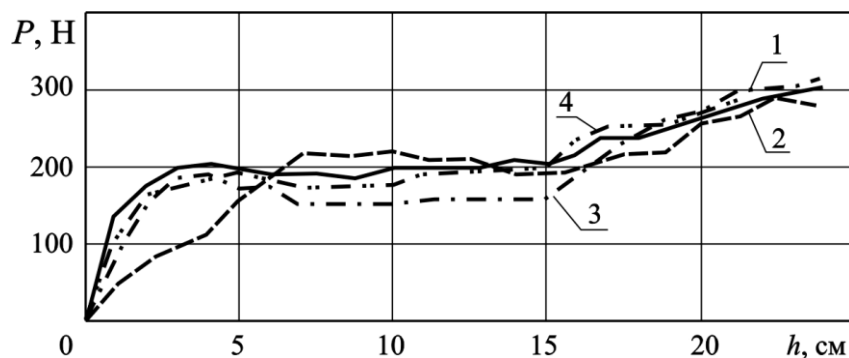


Рис. 3.19. Диаграммы твердости почвы
(на поле люцерны при влажности чернозема 26,9%),
замер наконечниками площадью основания 2 см²:
1 – цилиндрический; 2 – конический; 3 – эллипсоидальный; 4 – шаровой

На рис. 3.20. показана идеализированная зависимость усилия внедрения конического наконечника твердомера в почву от глубины погружения.

Начальный участок диаграммы OA имеет линейный характер и характеризует упругое уплотнение почвы. С увеличением глубины погружения происходит пластическое смятие почвы, и зависимость $p = f(z)$ имеет нелинейный характер (участок диаграммы AB). На участке диаграммы BC происходит пластическое течение почвы: наконечник погружается при постоянном усилии. Участок CD характеризует повышение твердости почвы подпахотного горизонта.

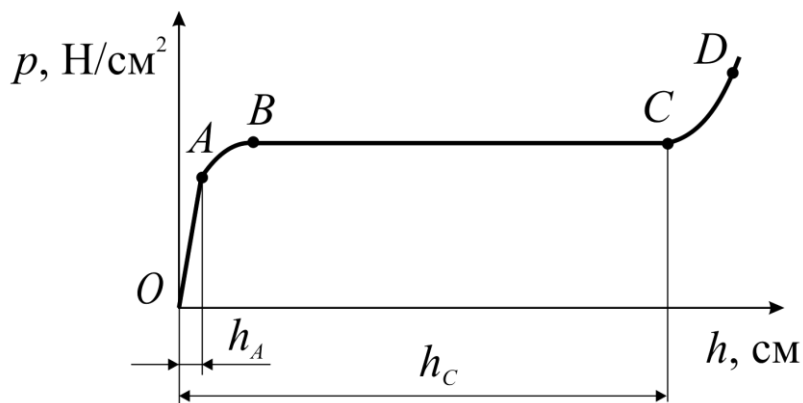


Рис. 3.20. Идеализованная диаграмма усилия внедрения наконечника твердомера в почву

Твердость почвы определяется по формуле

$$p = \frac{hq_{\text{п}}}{S}, \text{ Н/см}^2, \quad (3.27)$$

где h – средняя ордината диаграммы для установленной глубины или при необходимости всей глубины обработки, см; $q_{\text{п}}$ – жесткость пружины, Н/см; S – площадь наконечника твердомера, см².

Следует оговориться, что зависимость (3.26) характеризует твердость почвы или напряжение, возникающее в почве, только на участке OB диаграммы.

По диаграмме (рис. 3.20) можно определить коэффициент объемного смятия почвы

$$k = \frac{p_A}{h_A S}, \text{ Н/см}^3, \quad (3.28)$$

где p_A и h_A – усилие и глубина, соответствующие точке A диаграммы.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Средние значения коэффициента объемного смятия для свежеспаханной почвы составляют $1 \dots 2 \text{ Н/см}^3$; для жнивья, паров и лугов $5 \dots 10 \text{ Н/см}^3$; для грунтовых дорог $50 \dots 90 \text{ Н/см}^3$ [62].

Ввиду анизотропности физико-механических свойств, почвогрунты проявляют различные сопротивления при сжатии и растяжении. Это объясняется тем, что водно-коллоидные связи между частицами и агрегатами дисперсных почвогрунтов в значительно меньшей степени сопротивляются отрыву, чем сжатию. При сжатии водные пленки, окружающие частицы, выжимаются и усилие воспринимают твердые частицы скелета, что повышает прочность почвогрунтов. Опыты [6] показали, что отношение модуля сжатия к модулю растяжения $E_{СЖ}/E_{РАСТ}$ составляет для глины 4, а для суглинка 3. В этих опытах выявлено также существенное различие значений пределов пропорциональности: при сжатии $\sigma_{II}=(1,5 \dots 2,5) \cdot 10^5 \text{ Па}$, при растяжении $\sigma_{II}=(0,2 \dots 0,5) \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Следует отметить, что модули упругости для реальных почвогрунтов не постоянны и могут уменьшаться (релаксировать) под воздействием нагрузки. Их величина в значительной степени зависит от скорости нагружения. Значения модуля упругости при линейной деформации можно принимать согласно табл. 3.7 [27].

При деформации любого материала выполняется определенная работа, которая аккумулируется в материале в виде потенциальной энергии W . В пределах пропорциональности, когда напряжения возрастают постепенно и силы инерции равны нулю, удельная потенциальная энергия в единице объема определяется по выражению

$$W = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E}. \quad (3.29)$$

Таблица 3.7

Значения модуля упругости	
Типы почвогрунтов	E , МПа
Пески средние и крупные	30...50
Пески мелкие и пылеватые	11...48
Глинистые грунты	5...40

3.3.2. Сопротивление почвы при трехосном сжатии - растяжении

При пространственном нагружении тело находится под воздействием трех взаимно перпендикулярных напряжений (рис. 3.21).

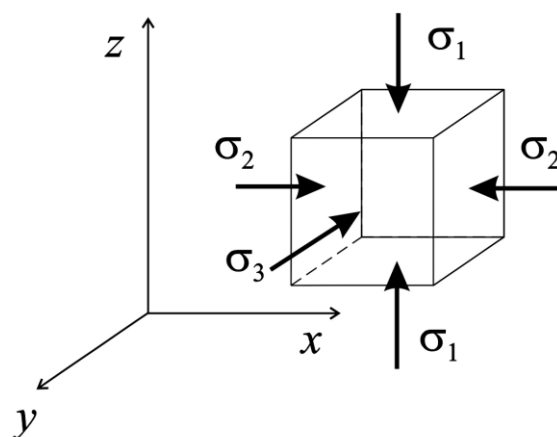


Рис. 3.21. Схема трехосного сжатия элемента почвы

Такая схема нагружения может наблюдаться в массиве пласта почвы под воздействием плужного лемеха. В общем случае напряженно-деформированное состояние в произвольно выбранной точке среды

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

определяется девятью величинами нормальных σ и касательных τ напряжений и девятью компонентами деформаций по трем взаимно перпендикулярным площадкам. Если по граням выделенного из среды элемента почвы будут действовать касательные напряжения, то грани элемента будут сдвигаться и поворачиваться, т.е. будет иметь место деформация формоизменения (рис. 3.22) или чистый сдвиг.

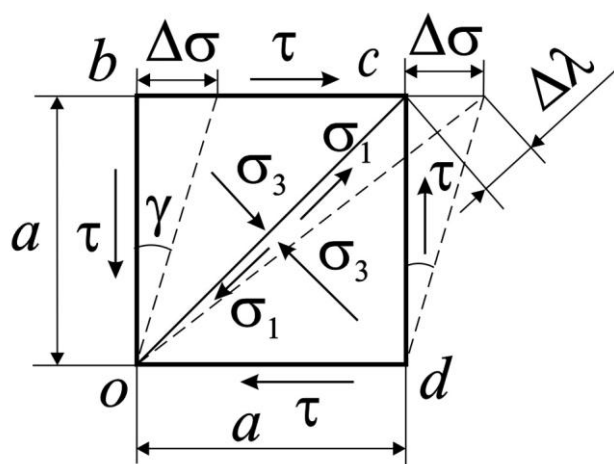


Рис. 3.22. Схема деформации элемента почвы при чистом сдвиге

Трехосное нагружение является общим случаем сжатия (растяжения) при блокированном или несвободном резании почвы, не содержащим деформации кручения. Напряжения σ_1 , σ_2 , и σ_3 называются в теории упругости главными напряжениями. В сечениях тела, соответствующих главным нормальным напряжениям, касательные напряжения равны нулю. Деформации по направлению действия главных напряжений определяются по уравнениям [79]

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]; \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)]; \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \right\}. \quad (3.30)$$

Относительная объемная деформация равна

$$\Delta V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 3\varepsilon_{CP}, \quad (3.31)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные линейные деформации.

С учетом (3.50) получим

$$\Delta V = \frac{1-2\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{3(1-2\mu)}{E} \sigma_{CP} = \frac{3\sigma_{CP}}{E_0}, \quad (3.32)$$

где $E_0 = \frac{E}{(1-2\mu)}$ – объемный модуль упругости.

Удельная потенциальная энергия упругих объемных деформаций равна

$$W = \frac{1}{2E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3). \quad (3.33)$$

3.4. Сопротивление почвы сдвигу

Отношение абсолютной деформации сдвига ΔS к размеру грани a

$\frac{\Delta S}{a} = \operatorname{tg} \gamma \approx \gamma$ определяет относительную деформацию сдвига.

Зависимость между касательным напряжением τ и относительной

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

деформацией сдвига в пределах пропорциональности (упругости) подчиняется закону Гука для деформации сдвига

$$\tau = G\gamma, \quad (3.34)$$

где G – модуль упругости материала при сдвиге.

Модуль сдвига G связан с модулем упругой деформации E и коэффициентом поперечной деформации (коэффициентом Пуассона) соотношением [79]

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \text{ или } G = E \frac{1 + \xi}{2(1 + 2\xi)}. \quad (3.35)$$

Численное значение модуля сдвига колеблется от $G=E/2$ (при $\mu=0$) до $G=E/3$ (при $\mu=0,5$). Для наиболее часто встречающегося значения

$$\mu = \frac{1}{3} \text{ величина } G = \frac{3}{8} E.$$

Параметр μ можно выразить через константы G и E следующим образом $\mu = \frac{E_0 - 2G}{2(E_0 + G)}$. Т.к. параметр μ изменяется от 0 до 0,5, то при

$\mu=0$ деформация происходит только по оси z , т.е. $\xi=0$ и $E_0 = 2G$, а при $\mu=0,5$ происходит изменение формы без изменения объема, в этом случае $E_0 \rightarrow \infty$ и $E = 3G$.

Соппротивление сдвигу определяют путем решения уравнений, связывающих внешнюю силу, действующую на образец, и сопротивление сдвигу по поверхности скольжения, например, используя уравнение Кулона-Мора (3.11).

На практике при определении величины сопротивления сдвигу в образце почвогрунта должно быть создано такое напряженное состояние,

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

при котором касательные напряжения превышают сопротивление почвогрунта сдвигу, и происходит сдвиг с образованием поверхностей скольжения или пластическое деформирование образца. Это может быть достигнуто несколькими способами поступательного или вращательного смещения частей образца [6]: 1) одно- или двухсрезным прибором среза; 2) разделением образца в условиях трехосного сжатия; 3) раздавливанием образца в условиях одноосного сжатия; 4) вдавливанием в почвогрунт штампов; 5) проворачиванием в почвогрунте вдавленной крыльчатки. Метод оценки сопротивления сдвигу, основанный на вдавливании в связные грунты шарового штампа, был предложен Н.А. Цытовичем [133]. Величину сопротивления сдвигу в этом случае вычисляют по формуле

А.Ю. Ишлинского для идеально пластичного тела $c = k \frac{P}{\pi D h}$, где c –

сцепление, P – нагрузка на штамп; D – диаметр шара; k – коэффициент равный для пластичных тел 0,18; h – глубина вдавливания.

3.5. Теория прочности Кулона-Мора

Для оценки прочностных и деформационных характеристик материала пользуются испытаниями образцов на растяжение и сжатие, в результате которых получают диаграммы, приведенные на рис. 3.2. По диаграммам определяют предельные напряжения (σ_L , σ_y , σ_T , σ_B) и величины упругих и остаточных деформаций.

Для определения прочности материала обычно достаточно знать предельное напряжение текучести σ_T или временное сопротивление σ_B , при котором появляются трещины. Но предельные напряжения легко определяются только для простых деформаций: растяжения или сжатия.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Для сложных напряженных состояний используют различные теории прочности [48].

Наибольшую известность и применение для почвогрунтов получила теория прочности Кулона-Мора, разработанная еще в XVIII в. Кулоном и окончательно сформулированная в XIX в. Мором. По этой теории разрушение начинается тогда, когда напряжение сдвига τ на произвольной площадке достигнет предельного значения, которое является функцией нормального напряжения σ на этой же площадке [78]

$$\tau = f(\sigma), \quad (3.36)$$

где $f(\sigma)$ – экспериментально определяемая функция.

Условие Мора можно также представить следующим образом

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = f\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right), \quad (3.37)$$

где $\sigma_1 > \sigma_3$ – главные нормальные напряжения.

Для определения вида функции $\tau = f(\sigma)$ Мор предложил строить ряд кругов предельных нормальных напряжений (рис. 3.23).

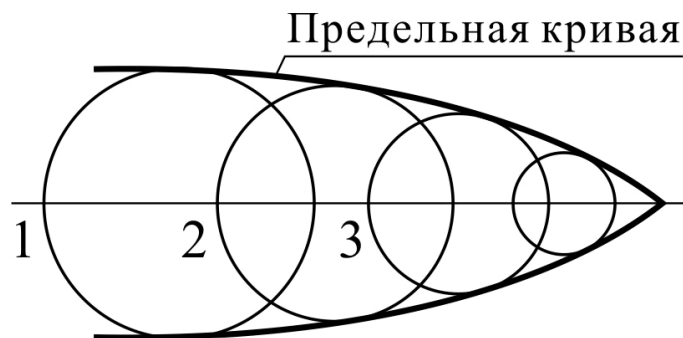


Рис. 3.23. Огибающая кругов Мора

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Из рис 3.23 следует, что наивысшие точки кругов Мора, соответствующие состоянию разрушения материала, лежат на предельной кривой, соответствующей функции $\tau = f(\sigma)$. На практике для напряженных состояний, изображаемых кругами Мора, огибающую кривую заменяют касательной к этим кругам прямой. Тогда предельное состояние аппроксимируется уравнением Кулона-Мора

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi = \sigma f_B, \quad (3.38)$$

где c – сцепление (когезия); $\sigma \operatorname{tg} \varphi$ – напряжение внутреннего трения.

В.П. Горячкин [31] считал, что в основу общей теории всех сельскохозяйственных машин и орудий должна быть поставлена теория разрушения материалов и теория клина. Он также полагал, что из всех теорий прочности для почв наиболее обоснованной является теория Кулона-Мора, согласно которой напряженное состояние считается предельным, когда оно удовлетворяет условию (3.38). Эта зависимость в координатах τ - σ может быть представлена графиком (рис. 3.24) [19].

Пользуясь кругами Мора можно определить напряжения, действующие на площадке наклонной к направлению главного напряжения (рис. 3.25).

Для построения кругов Мора в системе координат τ - σ по оси абсцисс откладывают величины предельных главных напряжений σ_1 и σ_3 ($\sigma_1 > \sigma_3$). Затем проводят окружность радиусом $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, описанную на разнице отрезков σ_1 и σ_3 как на диаметре. Координаты точек касания предельной прямой определяют величины разрушающих нормального σ_a и касательного τ_a напряжений. Угол α определяет положение площадки скольжения в момент разрушения.

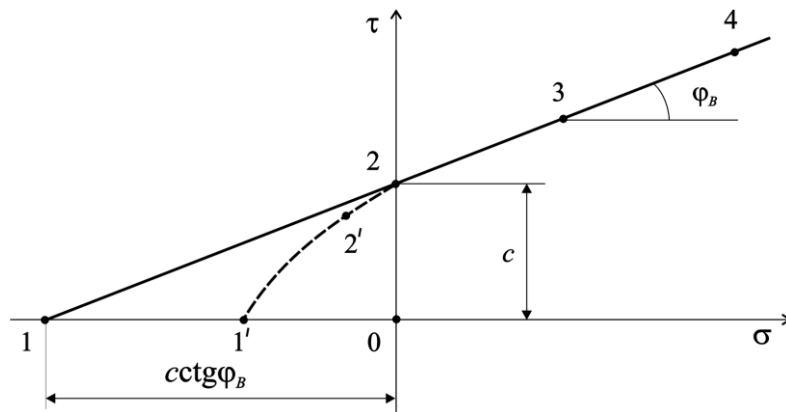


Рис. 3.24. Зависимость $\tau = f(\sigma)$ предельного касательного напряжения от нормального: 1-2-3-4 линейная зависимость; 1'-2' - предполагаемая зависимость в зоне отрицательных и малых значений σ

Заменяя предельную кривую прямой линией, условие предельного состояния Кулона-Мора можно записать для связных почв в виде [78]

$$\sin \varphi_B = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + \frac{2c}{\operatorname{tg} \varphi_B}}. \quad (3.39)$$

Для несвязных почв $c=0$, поэтому

$$\sin \varphi_B = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}. \quad (3.40)$$

На рис. 3.25 показана только половина круга Мора, поэтому зеркальное отражение точки a' относительно оси σ также определяет возможную плоскость разрушения. Нормаль к этой площадке с осью наибольшего главного напряжения σ_1 составляет угол 2α и угол α с направлением наименьшего главного напряжения σ_2 (рис. 3.26, б).

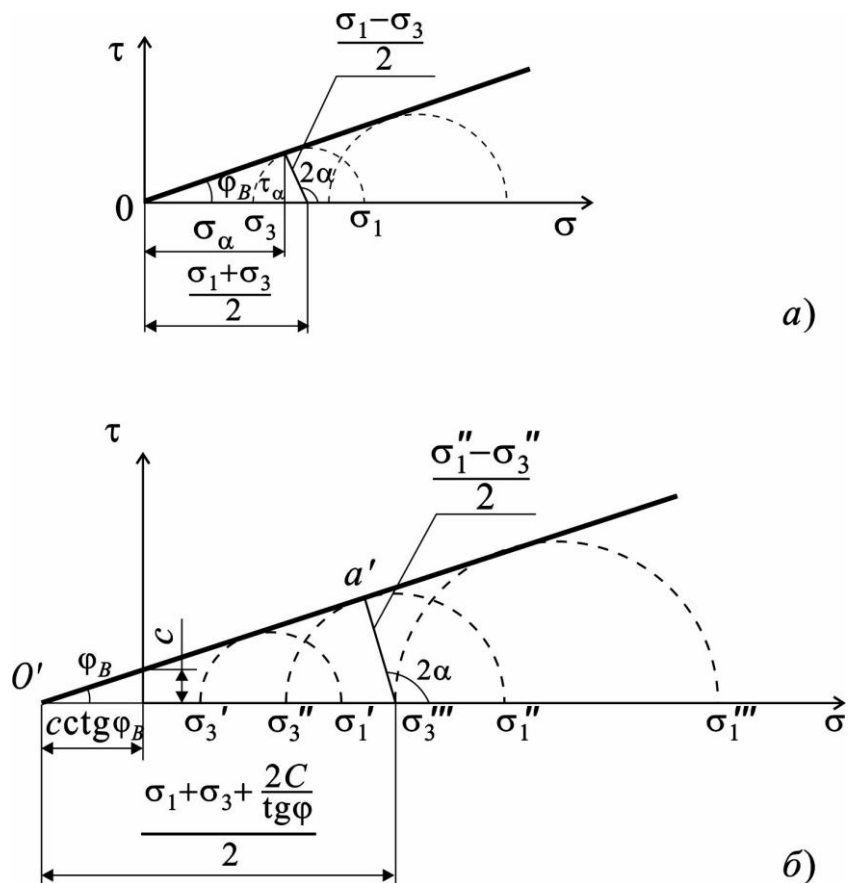


Рис. 3.25. Определение предельных напряжений с помощью кругов Мора:
 а – для несвязных почв; б – для связных (глинистых) почв

Из гипотезы Кулона о том, что разрушение происходит по площадке, на которой $|\tau| = c \pm \sigma \operatorname{tg} \varphi_B$ следует, что плоскость разрушения проходит через направление среднего напряжения σ_2 и

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

составляет угол α с направлением наименьшего главного напряжения σ_3 (рис. 3.26, в) при условии $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ [78].

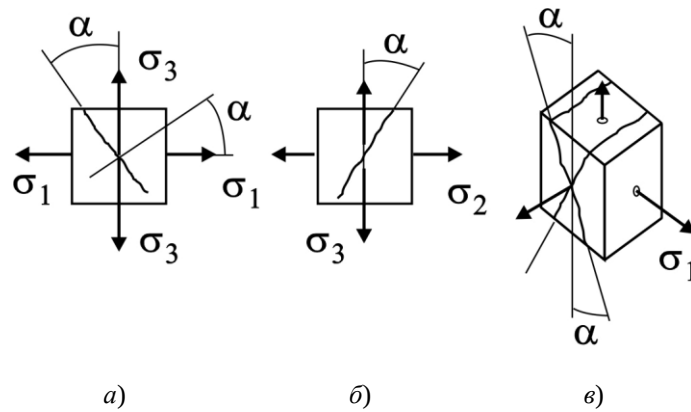


Рис. 3.26. Схема разрушения образца под действием главных нормальных напряжений:

a – разрушение, соответствующее точке a ; b – разрушение симметричное точке a ; $в$ – равновероятные площадки разрушения при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

Если выполняется условие Мора, записанное в главных напряжениях (3.39), то положение плоскости разрушения определяется углом разрушения α , равным

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_B}{2}, \quad (3.41)$$

тогда из выражения (3.39) получим

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_B}{2} \right); \quad (3.42)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_B}{2} \right). \quad (3.43)$$

С учетом уравнения (3.38) имеем

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_B}{2}\right) - 2c \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_B}{2}\right); \quad (3.44)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_B}{2}\right) - 2c \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_B}{2}\right). \quad (3.45)$$

Величины σ_a и τ_a определяются по формулам

$$\sigma_a = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha; \quad (3.46)$$

$$\tau_a = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha. \quad (3.47)$$

Касательное напряжение достигает максимального значения при $\alpha = \pi/2$, т.е.

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (3.48)$$

Нормальное напряжение на этой площадке при $\alpha = \pi/2$ будет равно

$$\sigma_{\alpha=\pi/2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (3.49)$$

Вычисление по формулам (3.46) и (3.48) может быть заменено графическим построением кругов Мора [78] (рис. 3.27).

Из графика рис. 3.27 выводятся те же формулы для σ_a и τ_a для любой точки, расположенной на окружности AB под любым углом α .

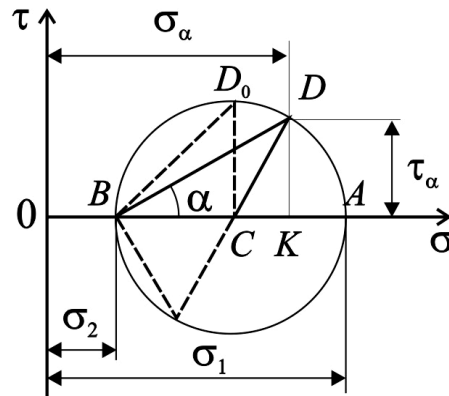


Рис. 3.27. Графическое определение напряжений при помощи круга Мора

Из теории прочности Кулона-Мора следует, что сопротивление почвы сдвигу зависит от двух физических констант: внутреннего трения и сцепления.

Внутреннее трение представляет собой силы, возникающие между почвенными частицами при действии на них нормальных напряжений [90]

$$T = f_B \sigma. \quad (3.50)$$

Физическое представление о коэффициенте внутреннего трения f_B можно получить из условия начала движения частиц по плоскости скольжения, когда касательное напряжение на плоскости сдвига (разрушения) оказывается равным напряжению внутреннего трения

$$\tau = T = f_B \sigma. \quad (3.51)$$

Из схемы на рис. 3.28 следует, что

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \sigma_Z \sin \varphi_B; \\ \sigma &= \sigma_Z \cos \varphi_B \end{aligned} \right\}. \quad (3.52)$$

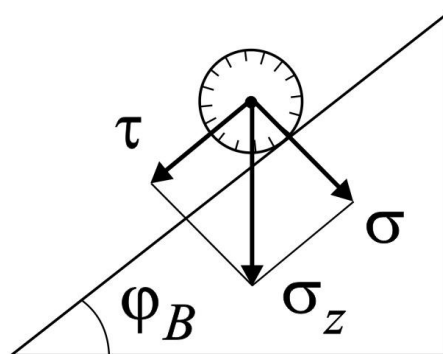


Рис. 3.28. Схема к определению коэффициента и угла внутреннего трения

Решая совместно уравнения (3.51) и (3.52), получим

$$f_B = \operatorname{tg} \varphi_B, \quad (3.53)$$

где φ_B – угол внутреннего трения.

Согласно зависимости (3.51) силы трения представляют собой касательные силы реакции на поверхности соприкасающихся тел и, соответственно, равны касательным силам приложенных внешних сил. Противодействие относительному перемещению соприкасающихся разнородных тел в плоскости скольжения по В.А. Кацыгину [54] – это внешнее трение. Относительное перемещение частей однородных тел – это внутреннее трение. Величина коэффициентов внешнего и внутреннего трения почвы зависит от механического состава, содержания органики, влажности и пористости. В расчетах можно использовать данные табл. 3.8 для основных разновидностей дерново-подзолистых почв.

Из данных табл. 3.8 следует, что коэффициенты внутреннего трения в среднем на 16% больше, чем коэффициенты внешнего трения.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Таблица 3.8

Значения коэффициентов внешнего и внутреннего трения

Тип почвы по механическому составу	Фон	Влажность, %	Коэффициенты трения	
			Внутреннего, φ_v	Внешнего, φ
Супесь	Целина	12-20	-	0,65
	Стерня зерновых	12-20	0,79	0,62
	Слежавшаяся пахота	12-20	-	0,67
Суглинок легкий	Целина	12-20	0,76	0,67
	Стерня зерновых	15-17	0,72	0,67
	Слежавшаяся пахота	11-19	0,69	0,62
Суглинок тяжелый	Целина	15-20	-	0,66
	Стерня зерновых	16-20	0,76	0,64
	Слежавшаяся пахота	13-18	-	0,68
Торфяник	Целина	76-88	-	0,58
	Стерня зерновых	70-76	0,73	0,65
	Слежавшаяся пахота	80-84	-	0,70

Сцепление C – это часть сопротивления почвы сдвигу при $\sigma=0$.

Сцепление создается в почве благодаря поверхностному натяжению между частицами, т.е. адсорбции частиц скелета почвы и цементационными свойствами коллоидных гелей, а также механическому сцеплению между твердыми частицами. Немаловажную роль в сцеплении играют также силы электрохимического взаимодействия между дисперсными частицами твердой фазы почвы.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Сцепление численно равно отрезку, отсекаемому предельной прямой на оси ординат (см. рис. 3.24, б). Отрезок, отсекаемый продолжением предельной прямой на оси абсцисс и равный $c \operatorname{ctg} \varphi_B$, эквивалентен величине сопротивлению внутреннего трения [6].

Сцепление c и коэффициент внутреннего трения f_B зависят от механического и гранулометрического состава почвы, степени ее уплотнения и влажности. На несвязных сыпучих почвах (пески, супеси) сцепление практически отсутствует ($c=0$), тогда уравнение (3.38) примет вид

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi_B. \quad (3.54)$$

Сцепление плотных почв с ненарушенной структурой достигает до 10...15 МПа, а с нарушенной структурой не превышает 0,5...0,7 МПа.

Зависимость сцепления c и угла внутреннего трения φ_B от влажности среднего суглинка показана на графике рис. 3.29 [6].

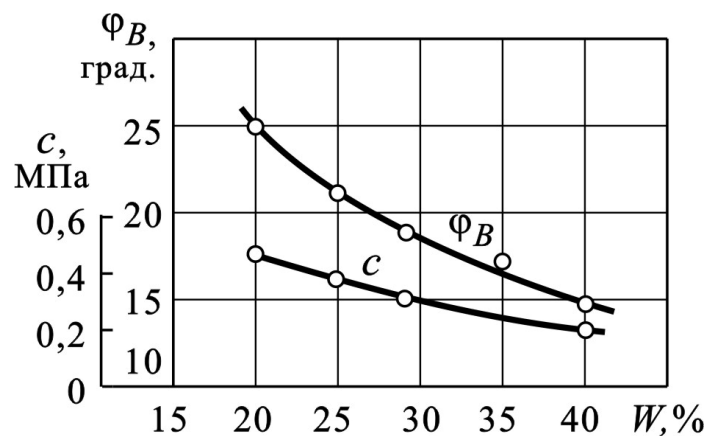


Рис. 3.29. Зависимость сцепления и угла внутреннего трения от влажности среднего суглинка

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Как следует из графика на рис. 3.29, сцепление и угол внутреннего трения резко уменьшаются при увеличении влажности почвы.

Значения коэффициентов внутреннего трения для некоторых видов почв приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Значения коэффициентов внутреннего трения f_B и сцепления c
(по данным Е.Н. Азямовой [54, 74])

Тип почвы	Глубина, см	Относительная влажность, %	f_B	c , МПа
Суглинок, стерня	5-10	16-17	0,70	0,5
	5-10	21-22	0,47	0,35
	20-25	13-14	0,54	0,40
Почва под посев	2-5	19-20	0,45-0,62	0,20
	5-10	21-23	0,40-0,42	0,05
Залежь	0-5	16-20	0,70-0,73	0,52
Супесь с дерновым покровом	0-10	8-10	0,74	0,18
	25-30	2-4	0,74	0,70

По данным В.В. Кацыгина [54], предельная величина сцепления $c_{\max}$ для связных суглинистых почв составляет 0,3 МПа, а коэффициент внутреннего трения $f_B = 0,6 \dots 0,8$.

Глава 4. Физические процессы механики почв

4.1. Физические процессы при взаимодействии рабочих органов с почвой

Механическая обработка почвы различными видами рабочих органов сопровождается резанием монолита пласта, его крошением, уплотнением и перемещением отдельных элементов или пласта в целом.

Резание монолита пласта почвы производится с отделением и без отделения стружки (рис. 4.1).

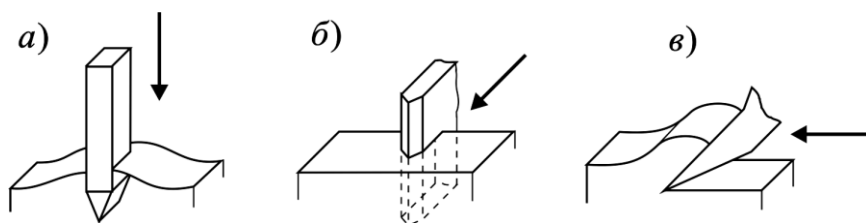


Рис. 4.1. Основные виды резания почвы:

a, б – резание без отделения стружки; *в* – резание с отделением стружки

Резание без отделения стружки выполняется перпендикулярно или параллельно поверхности пласта. В механике грунтов такой способ называют блокированным резанием, оно выполняется плоскими дисковыми или черенковыми ножами, стойками рыхлителей и щелевателей. Резание с отделением стружки выполняется плоскими и криволинейными клиновидными рабочими органами при поступательном или вращательном движении (лемехи плугов, лапы и наральники культиваторов, ножи фрез, сферические диски борон и луцильников и др.).

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Рыхление – это процесс разрушения монолита пласта и приведение его в рыхлое состояние, выполняется всеми видами рабочих органов при резании почвы с отделением стружки.

Крошение – это дробление крупных почвенных глыб и комков на более мелкие фракции. Выполняется также всеми видами рабочих органов.

Перемещение части или всего пласта производится при вспашке, дисковании, бороновании, культивации, при образовании борозд, гряд и гребней, при планировке поверхности полей и других технологических почвообрабатывающих и землеройных операциях.

Уплотнение – производится при изменении положения почвенных агрегатов и частиц, сопровождается повышением объемной массы, восстановлением скважности и капилляров. Выполняется различного типа катками и опорными устройствами машин и орудий.

Операции крошения, уплотнения и перемещения, как правило, осуществляются одновременно с резанием и перемещением почвы.

Согласно теории клина акад. В.П. Горячкина [35] все формы поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих машин можно рассматривать как развитие трехгранного клина (рис. 4.2). Клин OAB с углом α отделяет пласт от дна борозды; клин OBC с углом β отделяет пласт от стенки борозды, клин OAC с углом γ перемещает пласт. Одним из главных углов клинообразных рабочих органов является угол заточки i режущей кромки.

Конечно, это упрощенное описание работы клиньев. На практике трехгранный клин производит сложное деформационное воздействие на пласт почвы. Взаимодействие рабочих органов с почвой сопровождается рядом физических процессов (образование тел скольжения, нароста и др.), в значительной степени определяющих характер ее напряженно-

деформированного состояния и влияющих на процесс сопротивления почвы разрушению.

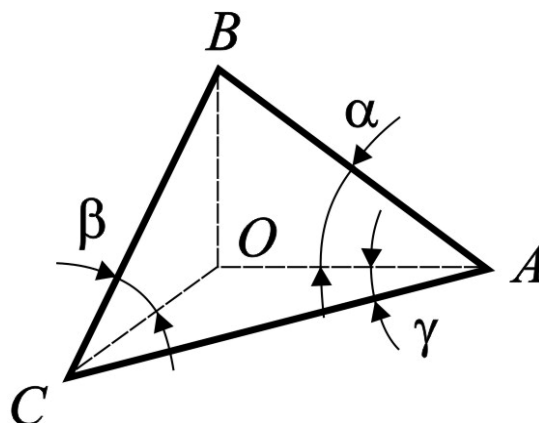


Рис. 4.2. Трехгранный клин и его составляющие простые клинья с углами α , β , γ

4.2. Резание почв без отделения стружки

Резание почвы без отделения стружки выполняют черенковые ножи и рыхлительные стойки чизельных плугов, глубокорыхлителей и щелевателей. В общем случае будем их называть вертикальным профилем.

На рис. 4.3 показана рыхлительная стойка и некоторые параметры прорези после ее прохода.

Перед движущимся вертикальным профилем в монолите почвы образуются уплотненное ядро, сколы и тела скольжения (по терминологии А.Н. Зеленина [48]). На рис. 4.3 длина такого скола на дневной поверхности пласта обозначена L' .

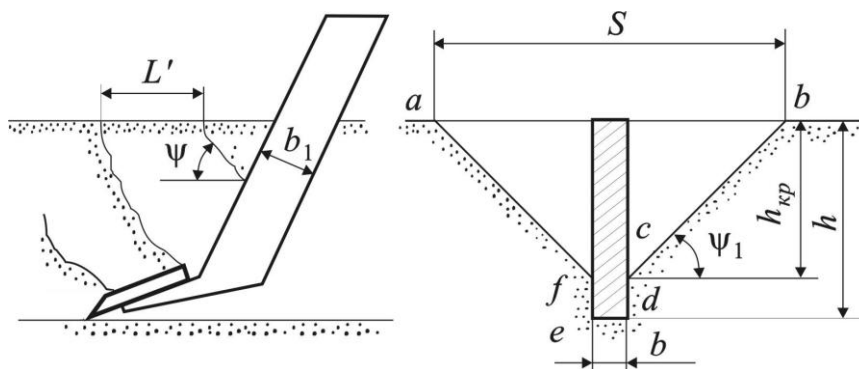


Рис. 4.3. Рыхлительная стойка с долотом и параметры прорези в почве

Сколы идут по линиям скольжения, т.е. это траектории движения частиц почвогрунта при смятии (рис. 4.4). Линии скольжения образуются перпендикулярно режущей кромке профиля, а затем отклоняются вверх, в сторону дневной поверхности почвогрунта.

Направление линий скольжения зависит от угла наклона режущего профиля (рис. 4.5). Из схемы на рис. 4.5 видно, что ниже нейтральной линии A , соответствующей максимальному давлению профиля на почвогрунт, линии скольжения отклоняются вниз. Поэтому при отрицательных углах установки профиля большая часть частиц почвогрунта вминается в стенки прорези. Процессы в почве ниже нейтральной линии A аналогичны процессам ниже уровня $h_{кр}$ на рис. 4.3.

Из схемы на рис. 4.4 видно, что перед профилем по линиям скольжения отделяется клинообразное тело, имеющее в плане форму раковины. В механике грунтов оно получило название тела скольжения или выпора. Совокупность периодически образующихся перед режущим профилем тел скольжения можно условно назвать стружкой.

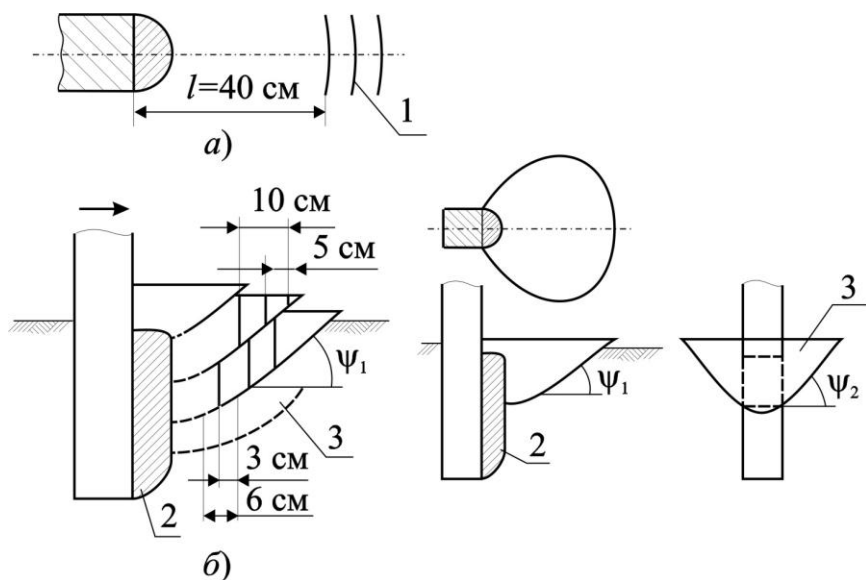


Рис. 4.4. Схема образования тел скольжения в связном грунте:
 ψ_1 и ψ_2 – углы скалывания, 1 – границы тел скольжения, 2 – уплотненное
 ядро из почвы, 3 – границы тел скольжения

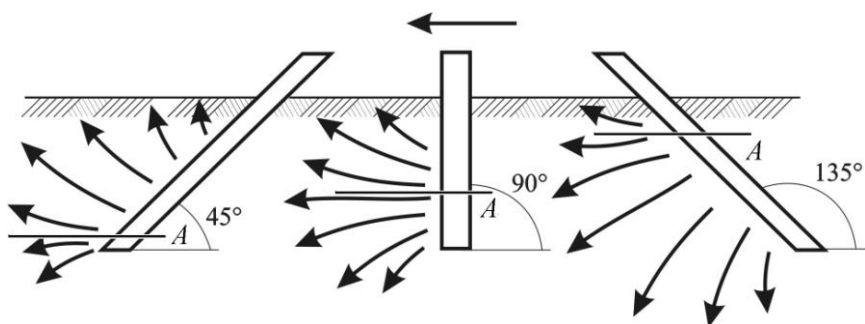


Рис. 4.5. Схема направлений линий скольжения в зависимости от угла
 наклона режущего профиля (A – нейтральная линия)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Даже при заблокированном резании образующиеся «стружки» или тела скольжения представляют собой усеченный конус с основанием в виде окружности или замкнутой кривой. Более наглядно образование пространственной формы тела скольжения дает схема на рис. 4.6.

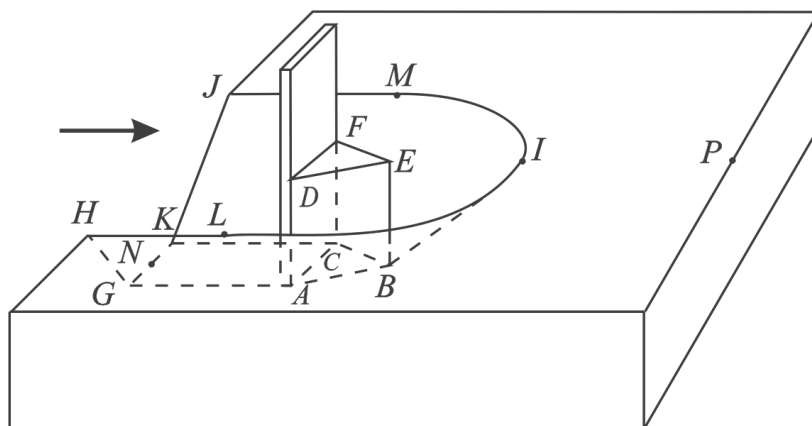


Рис. 4.6. Схема образования пространственной формы тела скольжения

Под действием прямого ножа с симметричной заточкой (ABCFED) образуется тело скольжения JMLIH [142].

Опыты показывают, что перед вертикальным профилем обязательно образуется **уплотненное ядро или нарост**. Физическая сущность наростообразования состоит в том, что на режущей кромке ножа образуется тело из уплотненного материала, которое движется перед ножом, не меняя своего состава. В некоторых условиях нарост периодически сходит с кромки ножа, а затем снова возобновляется. Форма уплотненного ядра преимущественно округлая, иногда конусообразная [40]. В опытах М.Х. Пигулевского [102] по вдавливанию штампа в песок с окрашенными слоями нарост имел клинообразную форму с округленной вершиной. Угол наклона граней составлял примерно 80° (рис. 4.7, а).

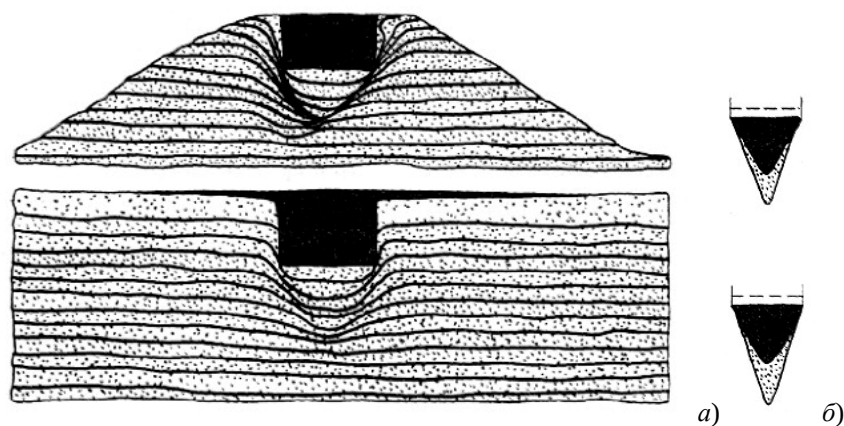


Рис. 4.7. Нарост на штампе в песке:
 а – опыты М.Х. Пигулевского; б – опыты В.Г. Березанцева

В опытах В.Г. Березанцева [16] были выделены две части уплотненного ядра: «жесткая», движущаяся вместе со штампом, и непрерывно меняющаяся по мере движения штампа (рис. 4.7, б).

Образование уплотненного ядра при различных углах заточки ножа показано на рис. 4.8 [19].

В опытах А.Д. Далина [40] на сухих плотных почвах нарост образовывался при угле заточки клина около 60° . На средних суглинках и супесях нормальной влажности нарост наблюдался при углах заточки $80 \dots 100^\circ$. И. Ратье [143] установил, что в песке нарост возникает на ноже, когда грани составляют с траекторией движения угол больше 45° .

Уплотненные наросты образуются не только на разрезающих ножах, но и на рабочих органах, работающих с отделением стружки, особенно при затуплении режущих кромок. Нарост образуется и на передней рабочей поверхности, и на затылочной фаске [141].

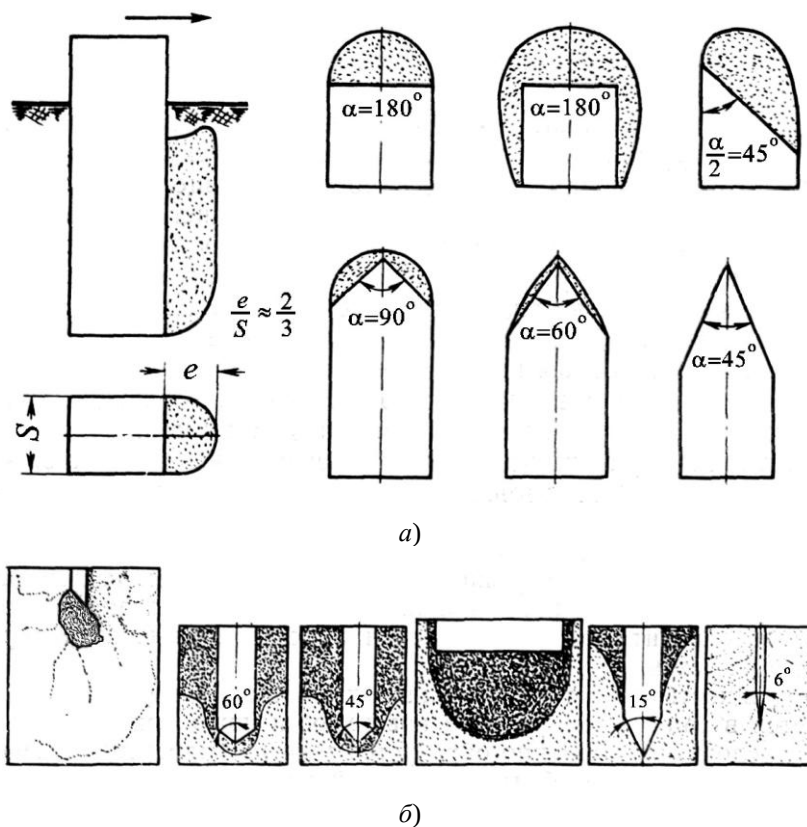


Рис. 4.8. Образование нароста на различных ножах:
а – в супеси по А.Н. Зеленину; б – в песке по И. Ратье

Затупление и изнашивание режущей кромки рабочих органов – неизбежный процесс, сопутствующий эксплуатации землеройных и почвообрабатывающих машин. Поэтому «режущая кромка» – это условное понятие. Четкой границы между режущей поверхностью и гранями ножа нет. Истинный профиль режущей поверхности в расчетах заменяют дугой окружности, вписанной в профиль граней и соприкасающейся с профилем граней ножа. Степень затупления условно характеризуется радиусом этой

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

окружности, а глубина резания затупленным ножом в строгих расчетах измеряется от центра окружности затупления. Появление на затупленной части ножа нароста дополняет тело ножа и участвует в резании почвы [19]. Образование стружки или тела скольжения, а также сопротивление резанию обязательно связано с характером нароста на лезвии и, особенно, на затупленной части ножа и затылочной фаске (рис. 4.9).

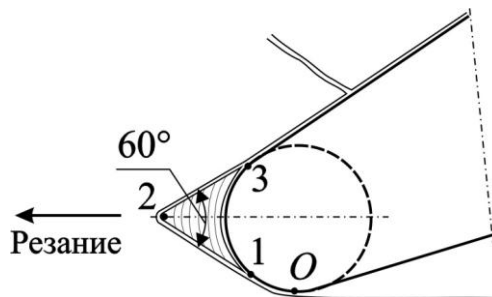


Рис. 4.9. Схема нароста при затуплении режущей кромки:
O – наиболее заглубленная точка поверхности затупления;
1 и 3 – точки основания нароста; 2 – вершина нароста

Характерной особенностью резания с образованием уплотненного ядра (нароста) является то, что, располагаясь впереди режущей кромки, ядро само раздвигает почву и, тем самым, увеличивает сопротивление резанию, т.к. коэффициент трения почвы о почву или грунта о грунт практически вдвое больше, чем почвогрунта о стальную поверхность (0,8...1,2 против 0,4...0,6). Этим можно объяснить рост тягового сопротивления плуга на 50% при затуплении ножа – лемеха в опытах Г.Н. Синеокова [122].

Изучению процесса наростообразования уделялось много внимания при резании металла. Исследователи не пришли к единому

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

мнению на природу процесса образования нароста. В.Д. Кузнецов [70] обобщая проведенные исследования, сформулировал следующие выводы:

1. На резце при некоторых условиях образуется нарост, структура которого существенно отличается от структуры обрабатываемого металла. Нарост обладает такой твердостью и прочностью, что сам может резать тот металл, из которого образовался.

2. Нарост уменьшает угол резания резца, если он больше 60° , уменьшает силу резания, уменьшает нагревание лезвия резца, удаляя от него центр максимального выделения теплоты, и защищает резец от износа, увеличивая его стойкость.

3. Вследствие образования нароста изменяется качество обработанной поверхности, тип стружки, ее завивание и цвет.

4. Существует определенная скорость резания, при которой получается максимальный нарост. При малых и больших скоростях нароста не образуется.

5. Нарост образуется только при сливной стружке, при других видах стружки он не появляется.

Несмотря на значительную разницу физико-механических свойств почвогрунтов и металла, процессы образования нароста в обоих случаях во многом сходны. Однако эти процессы еще недостаточно изучены и их влияние на закономерности резания почвогрунтов нуждается в дальнейших исследованиях.

Механизм образования уплотненного ядра можно наглядно объяснить по схеме, предложенной Н.Н. Ивановым [30] (рис. 4.10).

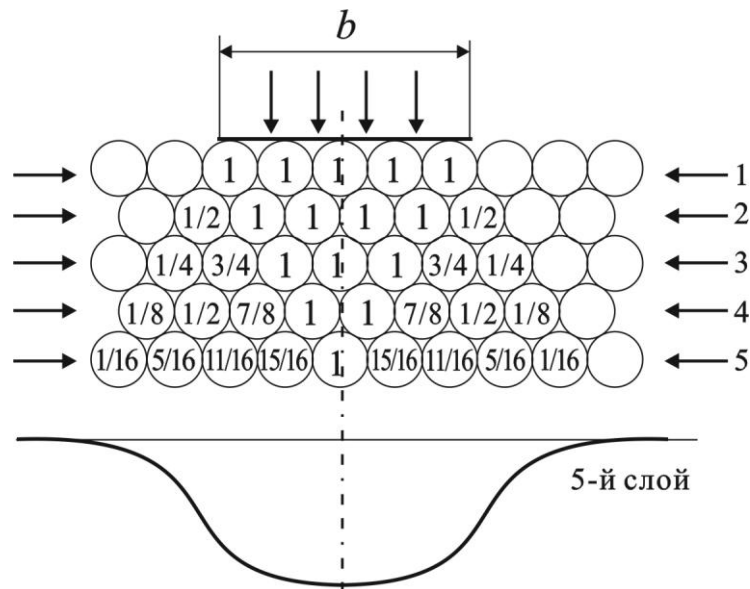


Рис. 4.10. Схема распределения давления перед плоским ножом в среде шарообразных частиц

Пусть почва состоит из ряда шарообразных частиц. Каждая шарообразная частица передает внешнее усилие поровну на два нижележащих шара, что позволяет вычислить распределение усилий в любом ряду шаров и построить эпюру напряжений. Как следует из схемы рис. 4.10, напряженная зона ограничивается прямыми линиями, проходящими под углом около 30° к осевой линии ножа. Максимальное давление испытывают частицы, заключенные внутри равностороннего треугольника со сторонами, равными толщине ножа b , т.е. образуется уплотненное ядро конической формы с закругленной вершиной.

Тела скольжения образуются только до критической глубины резания $h_{кр}$, т.е. когда ширина прорези равна толщине ножа (см. рис. 4.3). По данным Ю.А. Ветрова [19] критическая глубина резания зависит от

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

толщины ножа. Для землеройных машин с углом резания $35-45^\circ$ на песчано-глинистых грунтах $h_{кр} = (2,5...4)b$. При резании почвогрунтов ниже критической глубины $h > h_{кр}$, давления деформатора (ножа) недостаточно для образования тел скольжения с движением вверх и частицы почвогрунта сдвигаются и уплотняются в стенки прорези, как показано на рис. 4.11.

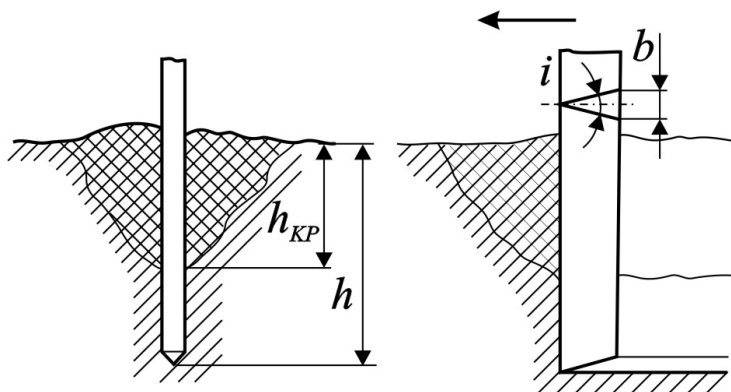


Рис. 4.11. Воздействие на почву вертикально движущегося деформатора

Процесс образования элементов стружки в условиях блокированного и полусвободного резания детально исследовал Ю.А. Ветров [19]. Он показал, что ширина элементов тел скольжения (стружки) превышает ширину зуба или ножа. Прорезь, как правило, имеет трапециевидальное поперечное сечение. Ее дно образуется поверхностью среза и является следом кромки ножа. Начиная с некоторой глубины, прорезь расширяется в сторону дневной поверхности.

Параметры прорези в почве при блокированном резании рыхлительной стойкой с долотом приведены на рис. 4.3. Основное влияние на параметры прорези - ширину S , критическую глубину рыхления $h_{кр}$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

имеет ширина ножа (стойки) b . Понятие о критической глубине резания было введено Е. Динглингером [19]. По его данным $h_{кр} = 74\sqrt{b}$, где b – ширина долота. Дальнейшие исследования не подтвердили эту зависимость: фактически критическая глубина резания в грунтах изменяется в широких пределах и может составлять в среднем от $(0,05 \dots 0,3) h$ до полной глубины резания.

При резании почвы, как до критической глубины, так и ниже критической глубины общим правилом является то, что линии перемещения частиц почвы при смятии или линии скольжения располагаются перпендикулярно линиям изобар (равных напряжений).

Расположение изобар в продольно-вертикальной плоскости при резании плоским ножом на глубину 0,4 м показано на рис. 4.12 [48]. Цифры в процентах показывают долю напряжений соответствующей изобары от величины контактного напряжения, принятого за 100%.

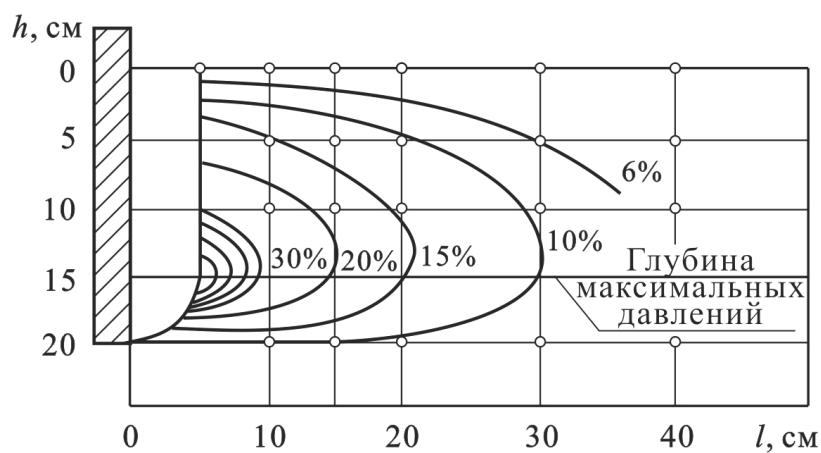


Рис. 4.12. Расположение изобар в продольно-вертикальной плоскости, проходящей по осевой линии плоского ножа

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Изображение изобар в плане перед вертикальным ножом показано на рис. 4.13.

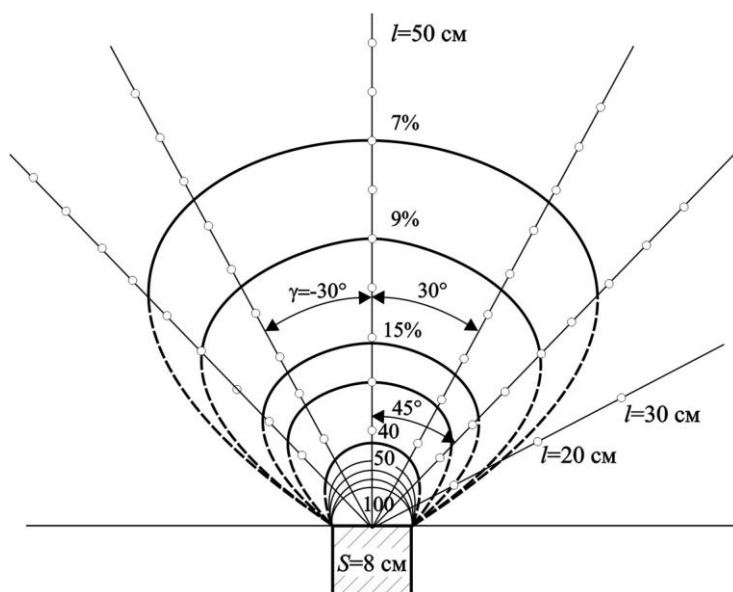


Рис. 4.13. Расположение изобар в плане перед ножом с плоским торцом (по А.Н. Зеленину)

Зависимость напряжений в почве в горизонтальной плоскости от расстояния l показано на рис. 4.14. Из графика следует, что напряжение в почве с увеличением расстояния от ножа резко уменьшается, и зависимость $p = f(l)$ имеет экспоненциальный характер.

Необходимо указать, что изобары, показанные на рис. 4.12 и 4.13 получены в относительных единицах с помощью эластичных датчиков и поэтому отражают только качественную сторону процесса [47].

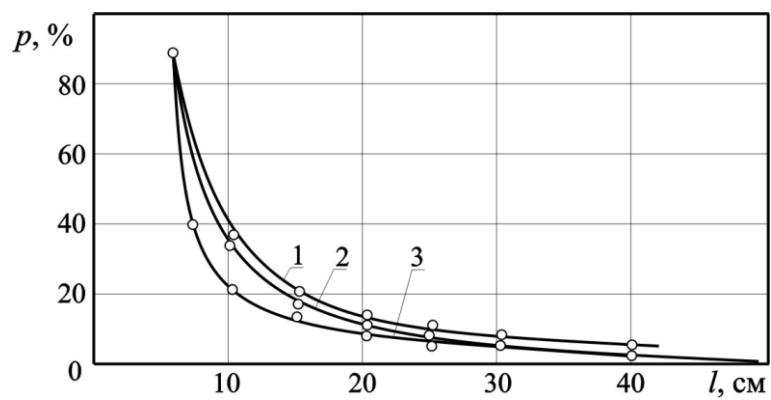


Рис. 4.14. Распределение напряжений в горизонтальной плоскости перед профилем толщиной $s=80$ мм: 1 - $\gamma=0^\circ$; 2 - $\gamma=\pm 30^\circ$; 3 - $\gamma=\pm 45^\circ$

На рис. 4.15 показаны изобары продольных сжимающих напряжений в продольно-вертикальной плоскости по оси нагруженной плоскости.

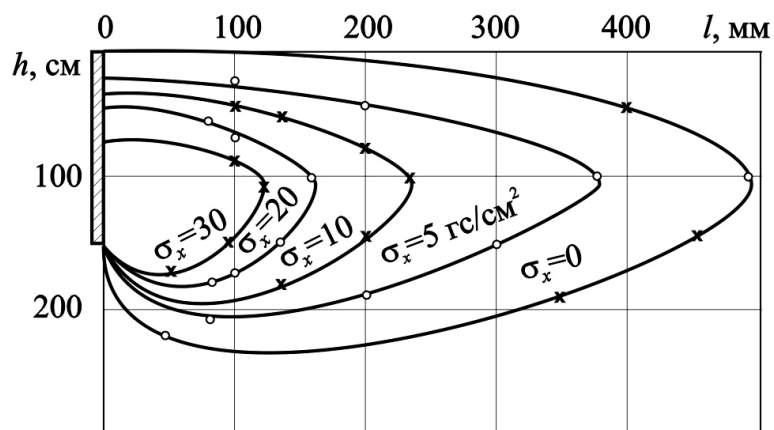


Рис. 4.15. Изобары продольных сжимающих напряжений в продольно-вертикальной плоскости

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Данные эпюры показывают, что зона поперечных напряжений больше, чем ширина пластины. В продольно-вертикальной плоскости максимальные напряжения концентрируются вблизи осевой линии и в нижней ее части, т.е. напряженная зона опускается значительно ниже пластины. В верхней части сжимающие напряжения рассеиваются.

Изобары на рис. 4.13 и 4.15 показывают, что перед режущим ножом или нагруженной плоскостью образуется поле напряжений, простирающееся на значительное расстояние вперед и ниже нагружающей пластины. Широкое поле напряжений перед режущим инструментом получено и при резании металлов (рис. 4.16) [70].

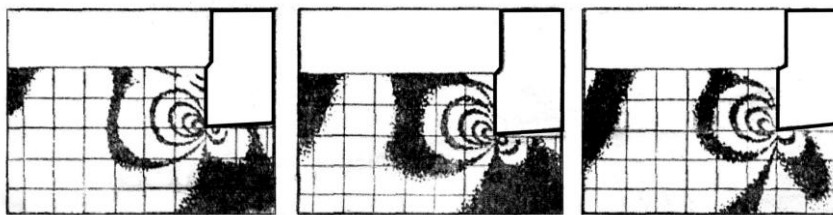


Рис. 4.16. Распределение напряжений в материале перед резцом

На рис. 4.16 видно, что зона напряжений распространяется достаточно широко перед резцом и под резцом.

Из этого следует важный практический вывод: если к существующему полю напряжений добавить дополнительное напряжение, то суммарное напряжение в результате интерференции может превзойти предельное напряжение разрушения данной почвы. Опыты по использованию интенсификации поля напряжения были поставлены Н.А. Уфиркиным [131]. Ударное воздействие на стенку борозды во время вспашки создавало в почве дополнительные волны напряжений, которые

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

накладывались на остаточные от прохода корпуса плуга. В результате интерференции напряжений внутренние связи в почве разрушались или ослабевали настолько, что при повторном проходе плуга тяговое сопротивление снижалось на 14...18%.

Другим примером использования наложения полей напряжений с целью снижения сопротивления почвы может служить глубокорыхлитель ударного действия по А.С. СССР № 949089 (МКИ E02 F5/30, 1982) (рис. 4.17).

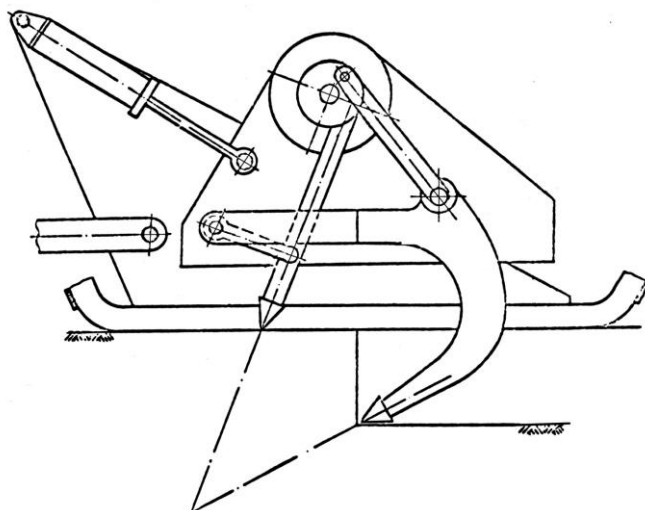


Рис. 4.17. Схема рыхлителя ударного действия

Благодаря взаимодействию полей напряжений от двух ударников возможно значительное снижение тягового сопротивления глубокорыхлителя.

Заслуживают внимания опыты [9] по резанию плотных и мерзлых грунтов с помощью рыхлителя и излучателя электромагнитной энергии,

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

помещаемого над поверхностью грунта (рис. 4.18). Рыхлитель по А.С. СССР № 783424 (МКИ E02 F5/530, 1982) включает энергетическую машину 1, четырехзвенный механизм навески 6 и 7 с гидроцилиндром 2, с передней 3 и задней 4 стойками и магнитострикционный вибратор 5 в виде катка с радиальными колебаниями. Задняя стойка 4 имеет консоль 8, на которой закреплены рыхлительные зубья.

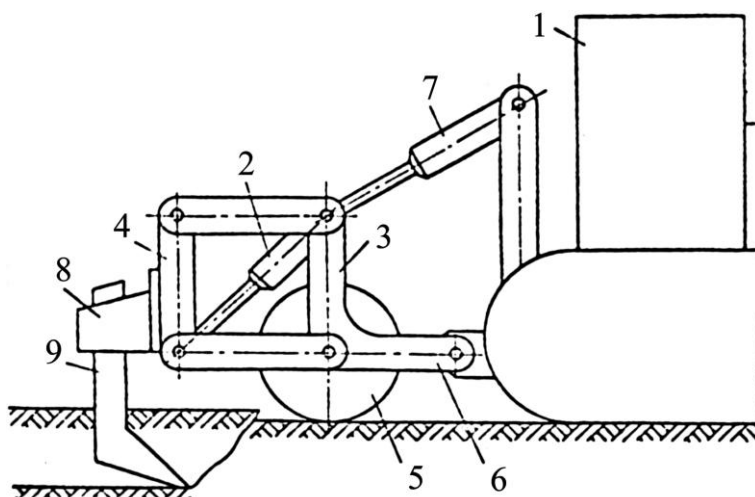


Рис. 4.18. Рыхлитель с магнитострикционным излучателем в виде опорного катка

Проведенные опыты показали, что для снижения прочности грунта и, следовательно, тягового сопротивления рыхлителя необходима определенная продолжительность воздействия электромагнитного поля, преобразованного в механическую энергию колебаний. Максимальное снижение энергозатрат происходило при скорости движения рыхлителя не превышающей 0,3 м/с.

4.3. Резание почвы с отделением стружки

В предыдущих разделах было показано, что в процессе деформации почвы клинообразными рабочими органами по преимуществу используется деформация сжатия, величина и характер которой зависят от физико-механического состояния почвы и геометрии клина. При сжатии локального объема почвы наступает момент, когда внутренние напряжения не успевают уравновесить внешние нагрузки, происходит разрыв межагрегатных связей и разрушение монолита пласта. Описанные физические процессы – образование линий и тел скольжения приводят к появлению трещин в продольной и поперечной плоскостях с образованием элементов стружек (рис. 4.19).

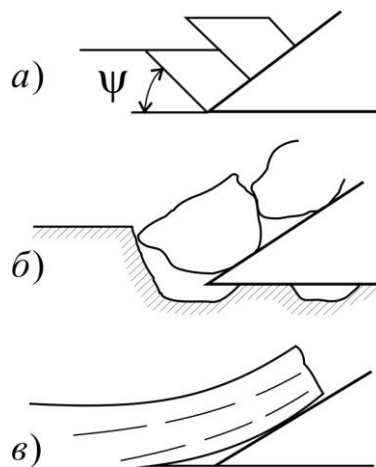


Рис. 4.19. Основные виды стружек (по В.П. Горячкину)

По В.П. Горячкину [31] деформация и разрушение почвы клином протекает следующим образом. Кли́н, внедряясь в почву, передней гранью

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

производит смятие почвенных частиц (рис. 4.20). Сжатие продолжается до тех пор, пока напряжения в пласте не достигнут предельной величины, необходимой для образования поверхностей сдвига или отрыва под углом ψ .

Необходимо отметить, что изображение поверхности сдвига под углом ψ достаточно условно, так как поверхность сдвига в почве имеет криволинейную форму, однако широко применяется для моделирования процесса.

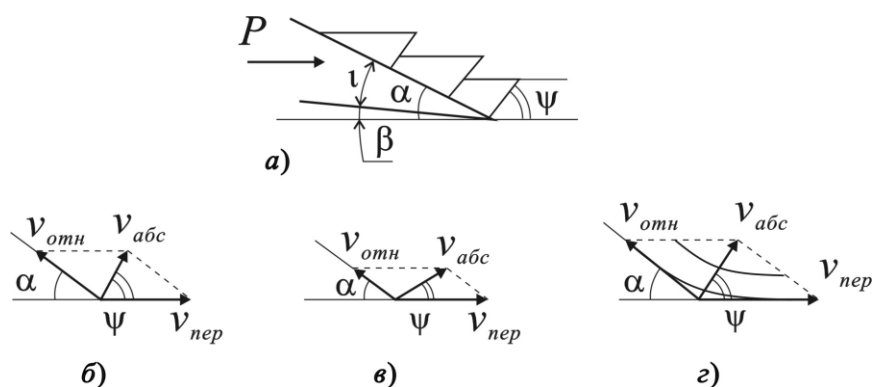


Рис. 4.20. Процесс взаимодействия клина с почвой и абсолютная скорость движения стружки: а – воздействие клина на пласт; б – скорость стружки плотной почвы, в – среднеувлажненной почвы, г – задернелой почвы

Направление абсолютной скорости движения стружки определяется видом деформации, состоянием почвы и углами клина. В момент уплотнения почвы ее частицы перемещаются перпендикулярно передней грани клина под углом $\psi = \frac{\pi}{2} - \alpha$. При обработке связных,

среднеувлажненных почв угол ψ направления абсолютной скорости перемещения частиц определяется из условия достижения максимума

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

касательных напряжений (по теории Кулона-Мора) (рис. 4.20, в). При обработке задернелых почв, стружка отрезается сплошной лентой. В этом случае абсолютная скорость стружки имеет направление, совпадающее с биссектрисой угла, образованного передней плоскостью клина и дном борозды, т.е. $\psi = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}$. Твердая и сухая почва скалывается глыбами неправильной формы под переменным углом. Сыпучая несвязная почва под действием клина может сгруживаться, образуя призму волочения.

Для среднеувлажненных почв, процесс образования стружки в общем случае складывается из двух периодически повторяющихся фаз (рис. 4.21): 1) уплотнение почвы клином и вдавливание ее частиц в еще недеформированную массу при перемещении клина из точки O в точку O_1 ; 2) скалывание (сдвиг) трапециевидной стружки под углом ψ . При дальнейшем движении клина стружка перемещается по его лицевой поверхности со скоростью V_r и одновременно скользит по плоскости сдвига O_1A_1 со скоростью V_a [123].

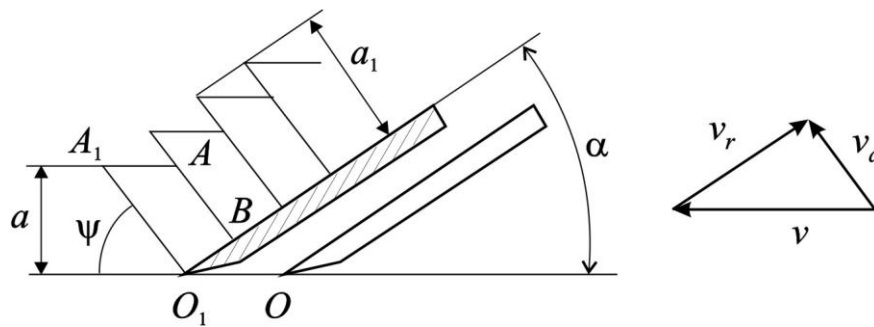


Рис. 4.21. Схема деформации почвы под воздействием двугранного клина

Из треугольника скоростей находим:

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$v_a = v \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \psi)}; \quad (4.1)$$

$$v_r = v \frac{\sin \psi}{\sin(\alpha + \psi)}, \quad (4.2)$$

где v – скорость поступательного движения клина.

Если принять гипотезу деформации почвы сдвигом, то относительная скорость движения стружки по поверхности клина $v_r < v$, а толщина стружки больше глубины хода клина $a_1 > a$.

Отношение a / a_1 характеризует «усадку стружки» и определяется из соотношения

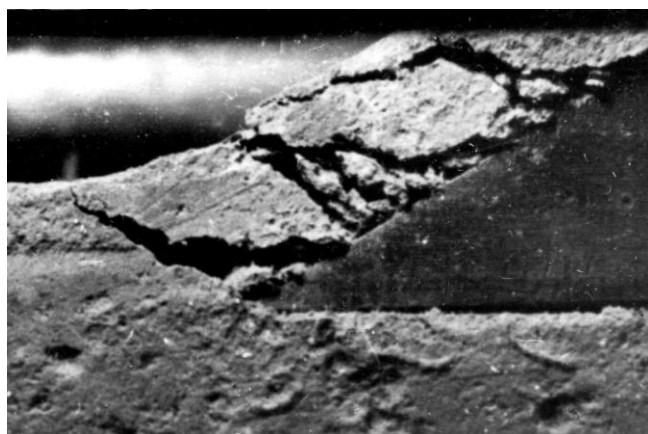
$$\frac{a}{a_1} = \frac{\sin \psi}{\sin(\alpha + \psi)}. \quad (4.3)$$

Из приведенных соотношений следует, что характер деформации пласта определяется углом крошения α и свойствами почвы.

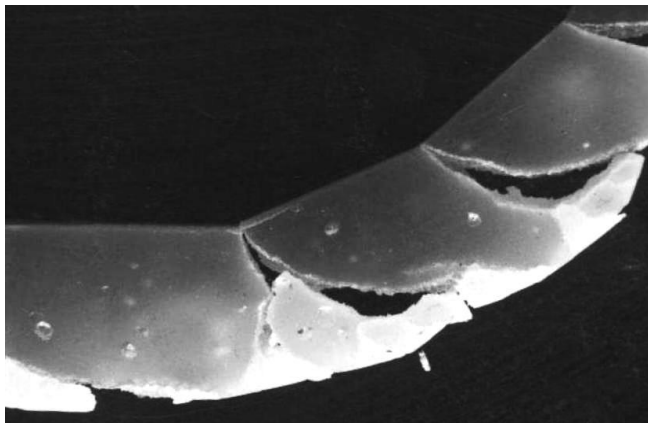
В научной литературе длительное время, начиная с опытов Т.М. Гологурского [29] велся спор о том, как деформируется почва – сдвигом или отрывом. Вслед за Т.М. Гологурским, В.П. Горячкин, А.Н. Зеленин, Ю.А. Ветров, N.M. Nichols [147], W. Soehne [148] и многие другие, утверждали, что основным видом деформации почвогрунтов является сдвиг. Однако с этим утверждением не соглашался Г.Н. Синеоков [122]. Ссылаясь на опыты В.В. Бородин, В.Г. Кирюхина [60], он полагал, что среднесуглинистые почвы оптимальной влажности деформируются отрывом. Но уже сама схема образования стружки для различных типов почв (см. рис. 4.19) показывает, что форма стружки имеет вероятностный характер, зависящий от состояния почвы и геометрии клина, что было в дальнейшем обосновано Ю.Ф. Новиковым.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Основанием для идеализированных моделей служит обобщение опытных данных. В этом отношении значительный интерес представляют опыты Г.Н. Синеокова по резанию почвы и парафина (рис. 4.22, 4.23).



a



б

Рис. 4.22. Деформация связной почвы (*a*) и парафина (*б*) под действием клина с образованием серии предварительных сдвигов [121]

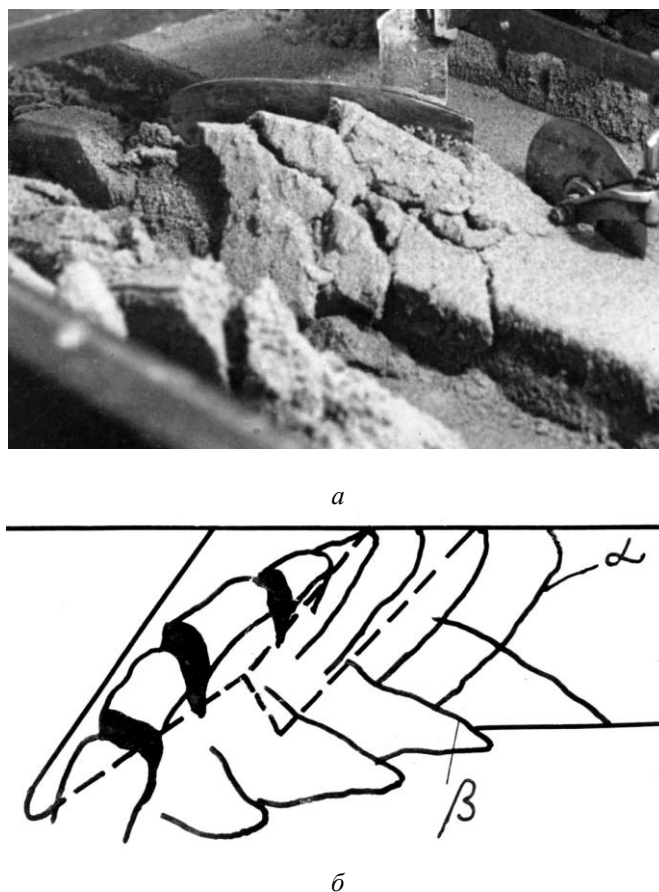


Рис. 4.23. Вид пересекающихся поверхностей скольжения и разрывов в пласте почвы при работе модели плуга; *а* – фото, *б* – схема [121]

Обобщающий анализ показал, что процесс отделения пласта от монолита может быть описан состоящим из двух фаз: серии сдвигов в нижней части пласта не достигающих поверхности поля и, затем, образование криволинейной трещины отрыва или сдвига достигающей поверхности поля. Кроме того, в силу действия касательных напряжений,

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

максимум которых приходится на ось инерции пласта, пласт делится на слои поверхностями сдвигов параллельно и перпендикулярно поверхности поля. Таким образом, деформация почв, выглядящая как деформация отрывом, реально может включать скрытый процесс предварительной деформаций сдвигом.

Фаза предварительных сдвигов почвы в нижней части пласта у В.П. Горячкина получила наименование «смятие почвенных частиц» [31] а у Г.Н. Синеокова – «уплотнение почвы клином и вдавливание ее частиц» [123].

Изучению процесса образования стружки при резании металлов посвящено много научных исследований. Образование ступенчатой стружки сдвига описывали И. Тиме, К.А. Зворыкин, Н. Klopstock, М. Okochi и др.

И. Тиме вывел формулу коэффициента усадки стружки как отношение длины элемента стружки к длине хода резца. По его данным коэффициент усадки для различных металлов при углах резания $45...75^\circ$ изменяется от 0,5 до 0,65 [70], а процесс образования стружки состоит из ряда последовательных сдвигов и угол сдвига ψ не зависит от глубины резания, поэтому он может служить одной из констант, характеризующих свойства обрабатываемой среды.

С целью унификации терминологии, Ю.А. Ветров предложил для грунтов те же четыре наименования типов стружки, что и у металлов: стружка отрыва, элементная, ступенчатая (та же элементная, но не разделенная на отдельные фрагменты) и сливная.

Следует отметить еще одну особенность резания металлов. При движении резца, в обрабатываемом образце появляются трещины вследствие концентрации напряжений. Трещина, идущая впереди режущей кромки называется **опережающей трещиной**. Аналогичное

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

явление наблюдается и при резании почвогрунтов. Возникновение опережающей трещины существенным образом влияет на процесс образования стружки, а также на сопротивление резанию и степень измельчения материала (крошения).

Кроме отмеченных физических процессов, при резании металлов и пластичных почвогрунтов впереди резца и под ним происходит пластическая деформация обрабатываемой среды, которая распространяется также на некоторую глубину под обработанной поверхностью (см. фото на рис. 4.16). Проявление пластической деформации изменяет характеристики обрабатываемой среды: повышаются предел текучести и временное сопротивление, снижаются относительное удлинение при разрыве и ударная вязкость, обрабатываемая среда становится более хрупкой. На рис. 4.24 штриховкой показаны зоны пластической деформации при резании металла [70].

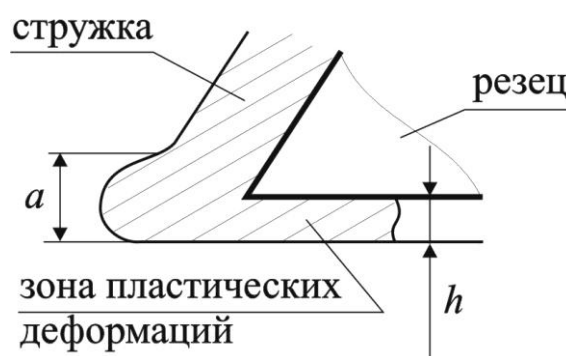
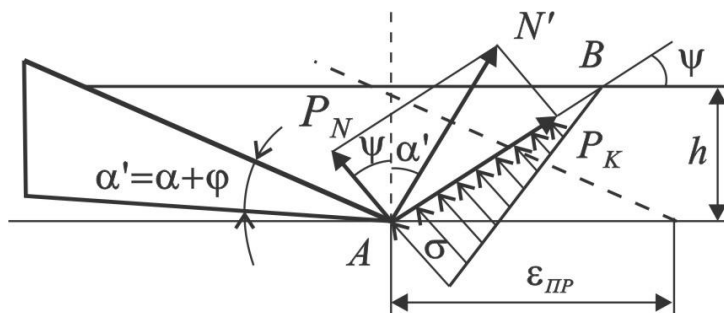


Рис. 4.24. Зоны пластической деформации при резании пластичного материала

Т.М. Гологурский отмечает, что если внутреннее трение меньше сцепления, то почва до разрушения значительно деформируется и ведет

Рассмотрим схему деформации пласта шириной b и высотой h двугранным клином (рис. 4.25).



Предположим, что пласт разрушается сдвигом вдоль плоскости AB под углом ψ . Силу N' , сжимающую пласт и нормальную к передней грани клина, разложим на две составляющие: силу P_K , действующую вдоль плоскости AB и силу P_N , нормальную к плоскости AB . Силы P_K и P_N равны

$$\left. \begin{aligned} P_K &= \frac{N}{\cos\varphi} \sin(\alpha + \varphi + \psi); \\ P_N &= \frac{N}{\cos\varphi} \cos(\alpha + \varphi + \psi) \end{aligned} \right\}. \quad (4.4)$$

- касательное

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$\tau = \frac{P_K \sin \psi}{bh} = \frac{N \sin \psi \sin(\alpha + \varphi + \psi)}{bh \cos \varphi}, \quad (4.5)$$

- нормальное

$$\sigma = \frac{P_N \sin \psi}{bh} = \frac{N \sin \psi \cos(\alpha + \varphi + \psi)}{bh \cos \varphi}, \quad (4.6)$$

Согласно теории Кулона-Мора разрушение материала происходит тогда, когда соотношение τ и σ удовлетворяет условию

$$\tau \pm f_B \sigma = k_q, \quad (4.7)$$

где $f_B = \operatorname{tg} \varphi_B$ - коэффициент внутреннего трения;

k_q – напряжение чистого сдвига.

Подставив в уравнение (4.7) значения τ и σ из (4.5) и (4.6) получим

$$k_q = \frac{N \sin \psi \sin(\alpha + \varphi + \psi)}{bh \cos \varphi \cos \varphi_B}. \quad (4.8)$$

Максимального значения напряжение k_q достигнет при равенстве нулю первой производной $\frac{dN}{d\psi} = 0$, т.е.

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha + \varphi_B + \psi}{2}. \quad (4.9)$$

Тогда нормальное давление на рабочую грань клина (без учета сил тяжести и инерции пласта) будет равно

$$N = \frac{k_q bh \cos \varphi \cos \varphi_B}{\cos^2 \left(\frac{\alpha + \varphi + \varphi_B}{2} \right)}. \quad (4.10)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

С учетом выражения (4.9) можно определить горизонтальную составляющую тягового сопротивления клина

$$P_x = \frac{k_q b h \cos \varphi_B \sin(\alpha + \varphi)}{\cos^2 \left(\frac{\alpha + \varphi + \varphi_B}{2} \right)} \quad (4.11)$$

или $P_x = k b h,$ (4.12)

где $k = \frac{\tau_{\text{пр}} \cos \varphi_B \sin(\alpha + \varphi)}{\cos^2 \left(\frac{\alpha + \varphi + \varphi_B}{2} \right)}$ - коэффициент пропорциональности

или удельного сопротивления резанию (здесь $\tau_{\text{пр}} = k_q$ - предельное напряжение почвы на сдвиг).

Приведенные соотношения получены при условии разрушения почвы сдвигом. В реальных условиях можно наблюдать разрушение почвы отрывом [121]. Для решения вопроса о характере образования почвенной стружки Ю.Ф. Новиков [84] предложил определять силу N из условия разрушения почвы за счет нормальных напряжений равномерно распределенных вдоль плоскости AB (см. эпюру нормальных напряжений σ в виде треугольника на рис. 4.25).

Из уравнения моментов относительно точки B найдем

$$\sigma = \frac{2N}{bh \cos \varphi_B} \sin \psi \cos(\alpha + \varphi + \varphi_B).$$

Угол ψ для этого случая находится из условия максимума функции $\sigma f(\psi)$, что дает

$$\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha + \varphi}{2}. \quad (4.13)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Максимальное давление на почву рабочей гранью клина будет равно

$$N = \frac{bh\sigma_{\text{ПР}} \cos\varphi}{1 - \sin(\alpha + \varphi)}, \quad (4.14)$$

где $\sigma_{\text{ПР}}$ – предельное сопротивление почвы отрыву.

Вопрос о характере разрушения почвы сдвигом или отрывом Ю.Ф. Новиков предлагает определять из отношения уравнений (4.14) и (4.10)

$$k'' = \frac{\sigma_{\text{ПР}}}{\tau_{\text{ПР}}} = \frac{1 - \sin(\alpha + \varphi)}{\cos^2\left(\frac{\alpha + \varphi + \varphi_B}{2}\right)} \cos\varphi_B. \quad (4.15)$$

Соотношение (4.15) приближенно изображается в виде прямой, разграничивающей области разрушения почвы сдвигом или отрывом (рис. 4.26).

Сумма углов $\alpha + \varphi$ в реальных условиях имеет значительный разброс, что существенно влияет на характер разрушения почвы. Так, при небольших значениях $(\alpha + \varphi) < 30 \dots 50^\circ$ разрушение почвы происходит за счет отрыва, при больших значениях $(\alpha + \varphi) > 50^\circ$ - за счет сдвига. Однако возможны случаи, когда сдвиг и отрыв одинаково вероятны, например, при влажности почвы 17% и интервале углов $(\alpha + \varphi) = 53 \dots 72^\circ$. Этот факт подтверждают фото, сделанные Г.Н. Синеоковым при работе клина на увлажненном суглинке с углами $(\alpha + \varphi) = 40 \dots 50^\circ$.

Из сказанного следует, что из-за изменчивости физико-механического состояния почвы и геометрии клинообразного рабочего

органа процесс образования стружки имеет вероятностный характер, что наглядно показал в свое время В.П. Горячкин (см. рис. 4.19).

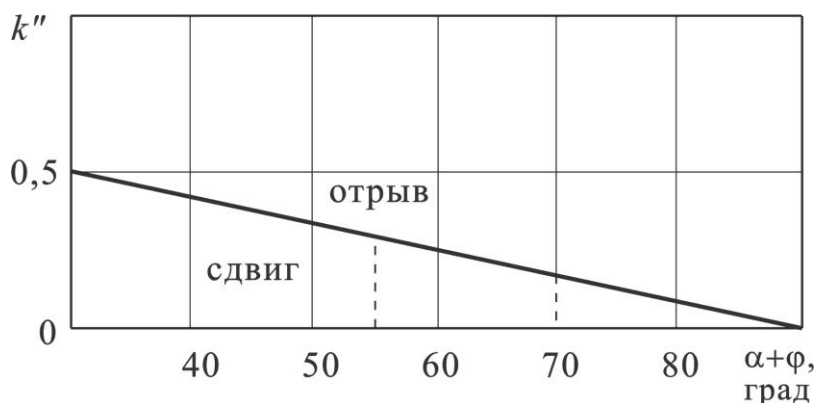


Рис. 4.26. График, разграничивающий деформацию почвы сдвигом и отрывом

На основании экспериментальных данных Ю.Ф. Новиков [84] считал, что вопрос о том, за счет каких напряжений будет разрушен пласт может быть решен, если удастся рассчитать или измерить величину предельной деформации $\varepsilon_{ПР}$ для обоих возможных случаев (см. рис. 4.25). Если при расчете окажется, что величина $\varepsilon_{ПР}$ для сдвига больше, чем для отрыва, то пласт разрушится за счет отрыва и наоборот. Величина $\varepsilon_{ПР}$ и связанная с ней частота чередования фаз деформация-разрушение являются объективными критериями процесса резания почвы, т.к. они могут быть определены из корреляционных функций сил сопротивления при работе клина или другого рабочего органа почвообрабатывающих машин.

Анализ осциллограмм тягового сопротивления двугранного клина показал, что величина предельной деформации $\varepsilon_{ПР}$ связана с частотой чередования фаз сжатия-разрушения соотношением

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$\nu_{\partial} = \frac{\pi V}{\varepsilon_{\text{ПР}}}, \text{ с}^{-1}, \quad (4.16)$$

где V – скорость движения рабочего органа.

Величина $\varepsilon_{\text{ПР}}$ определялась Ю.Ф. Новиковым из следующих предпосылок. В условиях блокированного резания почвы можно принять, что процесс деформации происходит в условиях одноосного сжатия. Тогда горизонтальная составляющая P_x нормального усилия (4.11) будет пропорциональна деформации почвы ε , т.е. нормальное давление на рабочей грани клина также будет пропорционально деформации. Это можно записать $q = \varepsilon E'$, где E' – коэффициент пропорциональности, Н/м³, характеризующий приращение давления q , Па, на единицу перемещения клина. На основании этих положений, Ю.Ф. Новиковым [87] выведены зависимости предельного перемещения клина:

- для сдвига

$$\varepsilon_{\text{ПР}}^2 = \frac{2h\tau_{\text{ПР}} \cos\varphi_B \sin(\alpha + \varphi) \sin(\alpha + \psi)}{E' \sin^3 \psi}; \quad (4.17)$$

- для отрыва

$$\varepsilon_{\text{ПР}}^2 = \frac{2h\sigma_{\text{ПР}} \sin(\alpha + \varphi) \sin(\alpha + \psi)}{E' \sin\psi [1 - \sin(\alpha + \varphi)]}. \quad (4.18)$$

В работе [84] в результате обработки осциллограмм тягового сопротивления клина с углом резания $\alpha = 20^\circ$ на черноземе плотностью $\rho = 1,11 \text{ г/см}^3$, $\tau_{\text{ПР}} = 2 \text{ Н/см}^2$ и $\sigma_{\text{ПР}} = 2,94 \text{ Н/см}^2$, $\varphi = 21^\circ$, $\varphi_B = 38^\circ$, $E' = 0,5 \text{ Н/см}^3$ получено, что частота процесса резания почвы находится в пределах $\nu_{\partial} = 12 \dots 20 \text{ с}^{-1}$, а величина $\varepsilon_{\text{ПР}}$ в диапазоне $0,0325 \dots 0,0587 \text{ м}$.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Эти результаты совпадают с данными А.Н. Гудкова [37].

Корреляционный анализ процесса резания почвы выявил, что разрушение почвы сопровождается, как правило, двумя доминирующими частотами: низкой ($12 \dots 20 \text{ с}^{-1}$) и высокой (до 50 с^{-1}). Появление высокой частоты объясняется зачисткой клином «гребешков» 1-1' и 2-2' на дне борозды, образующихся после скола (сдвига) основной стружки (рис. 4.27).

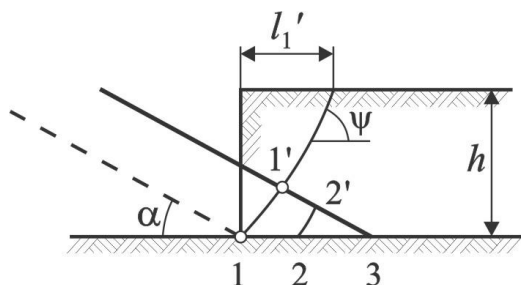


Рис. 4.27. Образование «гребешков» на дне борозды

Опыты [84] показали, что за период колебаний процесса $T = 2\pi / \nu_\phi$ низкая доминирующая частота характеризует образование основных стружек вдоль плоскости АВ (см. рис. 4.24), а высокая доминирующая частота объясняется зачисткой «гребешков». Это обстоятельство объясняет появление на дне борозды наряду с крупными мелкими комков почвы.

Обобщая сказанное, можно сделать вывод: образование стружки клинообразными рабочими органами происходит при смятии почвы передней гранью клина на величину $\varepsilon_{пр}$. Когда напряжения смятия достигают предельной величины, в результате пластической деформации в плоскости дна борозды образуется опережающая трещина АА' (см. рис. 4.24). После образования трещины пласт дополнительно нагружается

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

изгибающим моментом $M_{ИЗ} = P_N \varepsilon_{ПР}$, под действием которого окончательно происходит отрыв (сдвиг) элемента стружки.

Предложенный в качестве гипотезы процесс образования стружки сходен с процессом, описанным М.Д. Подскребко [103] (рис. 4.28).

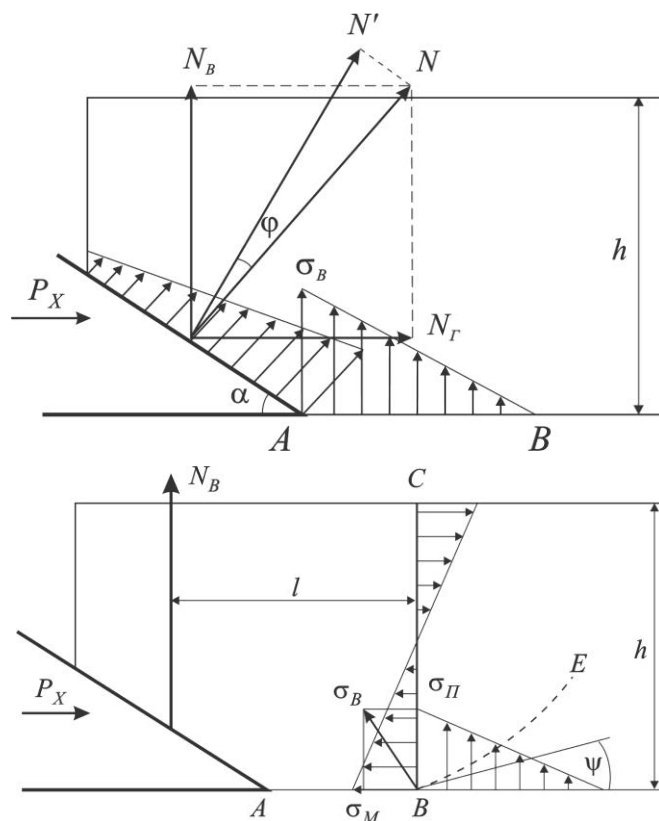


Рис. 4.28. Схема сил и эпюры напряжений при разрушении пласта (по М.Д. Подскребко)

Разрушение пласта происходит, по мнению М.Д. Подскребко, следующим образом. В плоскости дна борозды эпюра нормальных напряжений имеет вид треугольника с максимумом в точке A . Когда

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

растягивающие напряжения в этой точке достигнут предельного значения (временного сопротивления σ_B), в плоскости дна борозды образуется опережающая трещина AB поверхности отрыва. Поверхность отрыва (или линия скольжения) в своем развитии опережает движение клина, оставаясь вначале горизонтальной. С образованием трещины пласт дополнительно нагружается изгибающим моментом равным $N_B l$, где N_B – вертикальная составляющая давления N клина на почву. Под действием изгибающего момента трещина изгибается в направлении дневной поверхности под все возрастающим углом ψ (пунктирная линия BE). Скорость распространения пластической деформации и образования трещины является важной константой процесса деформации почвы.

Если учесть, что изгибающий момент $M_{из}$ вызывает касательные напряжения, которые достигают максимума τ_{max} у нейтральной оси инерции сечения пласта, и продольную составляющую силы резания, сдерживающую развитию опережающей трещины, то вероятно разрушение пласта сдвигом слоев $H_{сл}$ вдоль дневной поверхности (рис. 4.29, 4.30). [37, 21]. Расслоение пласта при работе отвальных орудий показано опытами Г.Н. Синеокова [121], а при изгибе пласта элементарным клином опытами А.Н. Гудкова [37].

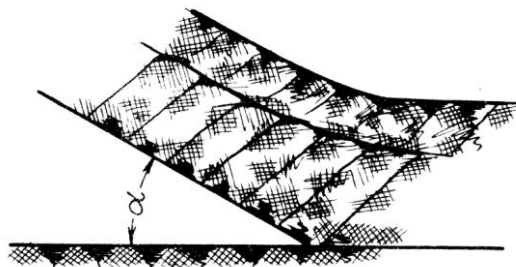


Рис. 4.29. Схема расслоения пласта под действием клина (по А.Н. Гудкову)

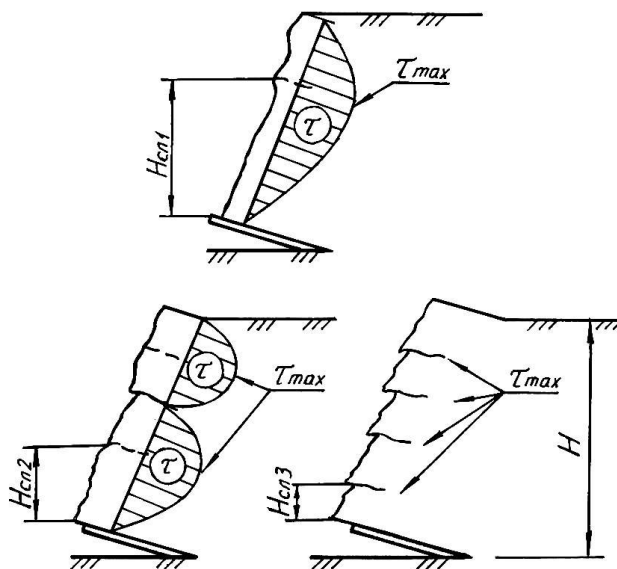


Рис. 4.30. Схема разрушения пласта слоями от действия максимальных касательных напряжений [21]

Таким образом, обобщенно процесс разрушения пласта можно описать состоящим из двух чередующихся фаз:

- образование серии сдвигов в нижней части пласта, а также горизонтального участка опережающей трещины за счет нормальных растягивающих напряжений в плоскости дна борозды;

- развитие криволинейной трещины отрыва или сдвига благодаря действию напряжений растяжения и сдвига в плоскости дна борозды и одновременное разделение пласта на слои от напряжений сдвига, возникающих под действием изгибающего момента.

Образовавшиеся тела скольжения (стружка) поднимается по клину. При дальнейшем движении клина происходит зачистка дна борозды и начинается процесс образования новых тел скольжения.

Глава 5. Методы расчета сил сопротивления резанию почвы

Акад. В.П. Горячкин [31] подчеркивал, что если в общей механике продукт резания составляет отброс (стружка), то в земледелии получение стружек с определенными параметрами является целью работы. Поэтому в основу общей теории всех земледельческих машин, по его мнению, должна быть положена теория разрушения материалов и теория клина. Наиболее применимой для почвы он полагал теорию прочности Кулона-Мора, по которой разрушение происходит при определенном (предельном) сочетании наибольшего и наименьшего нормальных напряжений.

Необходимо отметить, что до настоящего времени общепризнанной теории резания почв с учетом их реальных свойств и характеристик не существует. Поэтому различными авторами используются разные методы определения сил сопротивления резанию почв.

5.1. Аналитические методы определения сил сопротивления

Одной из первых работ по определению сопротивления почв резанию, основанной на теории Кулона-Мора, была работа Т.М. Гологурского [29]. Однако она была подвергнута острой критике М.Х. Пигулевским (его критические замечания изложены в том же издании книги Т.М. Гологурского). Основной недостаток М.Х. Пигулевский видел в том, что Т.М. Гологурский не учитывал реальные свойства почвы, а рассматривал ее как сплошную среду с изотропными свойствами.

Теорию Кулона-Мора использовал и В.П. Горячкин при разработке теории разрушения почв и теории клина. Он также

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

рассматривал почву как сплошную среду. Попытки предложить аналитические зависимости для определения сил резания почвогрунтов были сделаны И.Я. Айзенштоком [1] и Г.И. Покровским [105]. Но их формулы имели сложную структуру и были малопригодны для практического применения. К тому же для определения прочностных характеристик почвы нужно было провести длительные и кропотливые лабораторные исследования.

А.Н. Зеленин [47] считал основным недостатком существующих расчетов сопротивления резанию почвогрунтов с использованием теории Кулона-Мора то, что все усилие якобы затрачивается только на скалывание или сдвиг элемента почвенной стружки рабочей гранью клина. Поэтому расчетные значения сопротивления оказываются значительно меньше экспериментальных значений. По его данным усилие, затрачиваемое на сжатие и последующий сдвиг (скол) элементов стружки является частью общего сопротивления резанию. Для доказательства этого утверждения А.Н. Зеленин приводит следующее соображение. Если принять гипотезу Кулона-Мора, то в момент скола стружки усилие, фиксируемое динамометром, должно было бы уменьшиться до величины близкой к нулю. В действительности усилие резания в момент скола стружки снижается в среднем на 20...40%. По мнению А.Н. Зеленина, усилие на скалывание стружки составляет лишь 16,5...36% действительного усилия резания. Большая часть усилия резания затрачивается на вдавливание в почвогрунт режущей кромки рабочего органа. Дело в том, что режущие кромки любого почвообрабатывающего рабочего органа не являются абсолютно острыми, а всегда имеют толщину от 1 мм и более. При работе их толщина еще больше возрастает за счет износа, что влечет возрастание усилия резания, благодаря появлению на лезвии нароста (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Износ режущей кромки и образование нароста

Сопротивление почвы смятию режущей кромкой А.Н. Зеленин предлагает определять по зависимости

$$P_{CM} = \sigma_{CЖ} F \cos \alpha, \quad (5.1)$$

где $\sigma_{CЖ}$ – предельное напряжение сжатия; F – площадь смятия; α – угол резания.

Продольная составляющая общего усилия резания с учетом зависимости (4.11) будет равна

$$P_X = \frac{k_q b h \cos \varphi_B \sin(\alpha + \varphi)}{\cos^2 \left(\frac{\alpha + \varphi + \varphi_B}{2} \right)} + \sigma_{CЖ} F \cos \alpha. \quad (5.2)$$

По данным А.Н. Зеленина, расчеты по формуле (5.2) дают при угле $\alpha = 10^\circ$ отношение усилия на скол (сдвиг) к общему усилию 21%, а при $\alpha = 45^\circ$ это отношение составит 47%.

Таким образом, по современным данным расчет усилия резания почвы, основанный на теории Кулона-Мора, должен быть дополнен величиной усилия, необходимого для внедрения в почву режущей кромки рабочего органа. Это дополнение, как справедливо отметил А.Н. Зеленин, уточняет представление о механике разрушения почвогрунтов.

5.2. Сопротивление двугранного клина по теории Г.Н. Синеокова

Наиболее глубокое и тщательное исследование деформации и сопротивления почвы при работе двух- и трехгранного клина провел Г.Н. Синеоков [121, 122, 123]. В отличие от классической теории клина В.П. Горячкина, Г.Н. Синеоков в общее усилие резания дополнительно ввел динамическое давление почвы на рабочую поверхность клина, обусловленную инерцией пласта, а также нашел условие, обеспечивающее отсутствие сгуживания почвы, и определил зависимости КПД клиньев от их параметров.

В общем случае, по мнению Г.Н. Синеокова, общее сопротивление, преодолеваемое клином, можно подразделить на четыре вида: сопротивление почвы внедрению лезвия R_3 , сопротивление почвы деформации R_k , преодоление силы тяжести G и силы инерции пласта F (рис. 5.2).

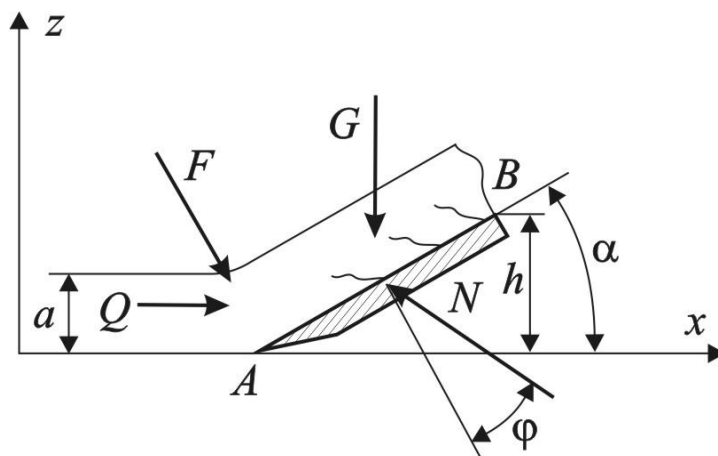


Рис. 5.2. Схема сил, действующих на двугранный клин
(по Г.Н. Синеокову)

Общая сила тяги двугранного клина, движущегося поступательно с постоянной скоростью по идеальным направляющим, будет равна

$$P_X = R_{3X} + R_{KX} + G_X + F_X. \quad (5.3)$$

При наличии затылочной фаски на лезвии Г.Н. Синеоковым получены следующие зависимости для составляющих силы R_3

$$R_{3X} = 0,5qh^2b(\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{ctg}\varepsilon_3 + 1); \quad (5.4)$$

$$R_{3Z} = 0,5qh^2b(\operatorname{ctg}\varepsilon_3 - \operatorname{tg}\varphi), \quad (5.5)$$

где q – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м³; h – высота затылочной фаски, м; b – длина лезвия, м; ε_3 – угол наклона затылочной фаски к дну борозды.

Из уравнения (5.5) следует, что на величину силы R_{3Z} стремящейся вытолкнуть клин (лемех, плуг, культиватор и т.п.) из почвы, наибольшее влияние оказывает высота затылочной фаски h . Со ссылкой на данные Е.П. Огрызкова, Г.Н. Синеоков рекомендовал допустимую высоту фаски для легких условий не более 10...11 мм, для твердой почвы – не более 4...6 мм. В этом случае плуг будет иметь допустимый (около 11%) коэффициент вариации глубины обработки.

Сила тяжести пласта, воспринимаемая клином, может быть определена по зависимости

$$G = abl\rho, \quad (5.6)$$

где a – глубина хода клина; b и l – ширина и длина клина; ρ – объемный вес почвы.

Г.Н. Синеоков рекомендует принимать $\rho = 1200$ кгс/м³ для расчетов работы культиваторов и $\rho = 1400$ кгс/м³ для плугов.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Динамическую составляющую силы сопротивления можно рассматривать как суммарную силу соударения частиц почвы о плоскость клина, тогда ее величину находим по теореме изменения количества движения

$$dm(\bar{v}_a - \bar{v}_1) = \bar{F}dt. \quad (5.7)$$

Так как скорость частиц до удара о клин равна нулю, то

$$\bar{F} = \frac{dm}{dt} \bar{v}_a. \quad (5.8)$$

Масса почвы, поступающая на клин в единицу времени, равна

$$\frac{dm}{dt} = abv_a \frac{\rho}{g}. \quad (5.9)$$

Принимая стружку ленточной формы, найдем

$$F = abv^2 \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (5.10)$$

Сила F приложена к рабочей поверхности клина и уравнивается реактивной силой R_F , отклоненной на угол φ от нормали к поверхности клина и подпором Q почвы, находящейся перед клином.

Наибольшие трудности представляет определение сопротивления деформации почвы R_K . Если брать за основу теорию прочности Кулона-Мора, то продольную составляющую этой силы можно определить по уравнению (4.11), но для этого надо знать предельное сопротивление почвы на сдвиг $\tau_{пп}$. В общем же случае сопротивление деформации, очевидно, зависит от поперечного сечения отрезаемой стружки, временного сопротивления почвы, геометрии клина и углов внешнего и внутреннего трения.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Г.Н. Синеоков принимает горизонтальную составляющую сопротивления деформации пропорциональной поперечному сечению пласта

$$R_{\text{кх}} = kab, \quad (5.11)$$

где k – коэффициент, учитывающий свойства почвы, а также геометрию клина.

Проектируя все действующие силы на координатные оси, и подставляя значения составляющих, получим зависимость силы тяги клина в развернутом виде

$$P_x = 0,5qh^2(\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon_3 + 1) + kabl\rho \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \frac{ab\rho}{g}v^2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi). \quad (5.12)$$

Если не учитывать влияние затылочной фаски (при работе с острой кромкой лезвия), то последнее уравнение запишется

$$P_x = abl\rho \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) + \frac{ab\rho}{g}v^2 \sin \alpha \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi). \quad (5.13)$$

Из уравнения (5.13) следует, что первый член правой части характеризует усилие, необходимое для преодоления статического давления пласта, обусловленное силой его тяжести, а второй член – усилие необходимое для преодоления динамического давления пласта, обусловленного его инерцией.

Теоретический анализ уравнения (5.12) в зависимости от входящих в него параметров весьма затруднен, из-за сложности его структуры.

Анализ, проведенный Г.Н. Синеоковым, показал, что усилие, необходимое для преодоления статического давления, обусловленного

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

силой тяжести пласта при изменении угла резания α и при $l = const$, изменяется по закону тангенсоиды, при $l = var$ и $h = const$ это усилие имеет максимум при определенном значении α . Динамическая составляющая с увеличением угла резания резко увеличивается. Указанные закономерности были подтверждены экспериментально. Так, в опытах М.Е. Мацепуро и И.В. Манюты [73] при испытании серии двугранных клиньев шириной 0,6 м при разной глубине хода, с увеличением угла α и при постоянной высоте $h = 0,5$ м удельное сопротивление k сначала уменьшалось, а затем возрастало (рис. 5.3). Аналогичные данные получены в опытах А.Н. Зеленина и Ю.А. Ветрова.

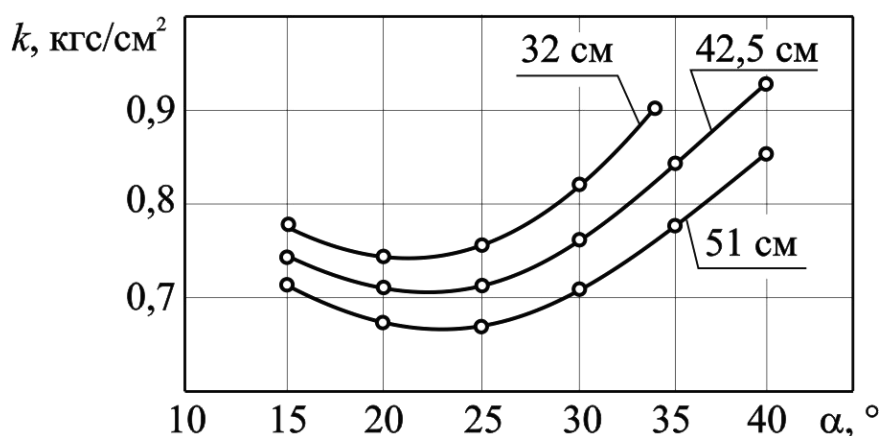


Рис. 5.3. Изменение удельного сопротивления k болотно-торфяного грунта с увеличением угла крошения α при постоянной высоте подъема пласта при разной глубине

Г.Н. Синееков ввел понятие о транспортном и деформационном КПД клина. Транспортный КПД – это отношение тягового сопротивления

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

с антифрикционной поверхностью к тяговому сопротивлению обычного клина. Транспортный КПД для клина, воздействующего на эластичный пласт почвы (ленточную стружку) равен

$$\eta_{TP} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}. \quad (5.14)$$

Деформационный КПД – это отношение усилия деформирования почвы антифрикционным клином к усилию деформирования обычным клином

$$\eta_{\partial} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi}. \quad (5.15)$$

При значениях $\varphi=25^\circ$ и $\alpha=30^\circ$ величины $\eta_{TP}=0,4$ и $\eta_{\partial}=0,55$, т.е. деформационный КПД выше, чем транспортный.

5.3. Рациональная формула силы тяги В.П. Горячкина

В своей работе «О силе тяги тракторных плугов» [33] В.П. Горячкин рассмотрел три составляющих силы сопротивления резанию почвы: силу сопротивления трению, силу сопротивления деформации и силу сопротивления перемещению (отбрасыванию) пласта. Формулу силы тяги В.П. Горячкин вывел для плугов, но с точки зрения механики она является универсальной, т.к. имеет «...общее значение для всякого орудия или машины, движущихся в какой-либо среде, как то: плуг в почве, пароход в воде, автомобиль или аэроплан в воздухе, резец при обработке металлов».

В дальнейшем рациональная формула тяги получила широкое использование не только в земледельческой механике, но и в других разделах техники.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Применительно к плугу рациональная формула имеет вид:

$$P = f'G + kab + \varepsilon abv^2, \quad (5.16)$$

где P – сила тяги; $f'G$ – сопротивление плуга при протаскивании в открытой борозде; a и b – глубина обработки и ширина пласта; G – вес плуга; f' – коэффициент эквивалентный коэффициенту трения плуга о почву; k – удельное сопротивление почвы резанию; v – рабочая скорость; ε – коэффициент пропорциональности.

Формула (5.16) расчленяет тяговое сопротивление на три указанные выше составляющие: 1) член $f'G$ характеризует сопротивление самого плуга, т.к. не зависит от поперечного сечения пласта почвы и скорости движения; 2) член kab характеризует сопротивление деформации пласта; 3) εabv^2 – это сопротивление на сообщение живой силы частицам почвы. Как следует из уравнения (5.16), величина силы тяги во многом зависит от выбора значений коэффициентов f' , k и ε .

Для плугов и других почвообрабатывающих машин коэффициент f' определяется при протаскивании машины в открытой борозде. Поэтому он включает не только силу трения опорных поверхностей рабочих органов, но и сопротивление опорных колес машины. В.П. Горячкин предложил при расчетах использовать значения f' в пределах 0,5...0,9. Эту часть силы тяги часто называют «мертвым сопротивлением». Оно составляет 10...15% от общего сопротивления.

Второй член формулы (5.16) характеризует сопротивление на отрезание и деформацию пласта. В среднем эта часть сопротивления составляет 50...55% от общего сопротивления. Коэффициент k обычно определяется прямым динамометрированием машин в полевых условиях и

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

его величина зависит от физико-механических параметров почвы и параметров почвообрабатывающей машины.

Третий член рациональной формулы отражает часть сопротивления, идущую на сообщение ускорения части массы пласта почвы, при его перемещении. По данным В.П. Горячкина в среднем коэффициент ε можно принять равным $1500 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

Применимость рациональной формулы для определения тягового сопротивления различных почвообрабатывающих машин была проверена В.П. Горячкиным и его последователями при обработке многочисленных данных динамометрирования в реальных полевых условиях. Однако в большинстве случаев значения коэффициентов формулы варьировали в широких пределах, что дало повод некоторым исследователям [102, 48] усомниться в пригодности рациональной формулы для определения тягового сопротивления не только плугов, но и других почвообрабатывающих машин.

В.П. Горячкин утверждал, что «...некоторое увеличение силы тяги плугов с увеличением рабочей скорости идет, главным образом, на более далекое отбрасывание почвы, а не на дополнительную деформацию». Дальнейшие более глубокие исследования показали, что не только третий, но и первые два члена рациональной формулы зависят от скорости приложения нагрузки [19, 103].

Удельное сопротивление почвы при динамометрировании почвообрабатывающих машин в полевых условиях определяется из рациональной формулы В.П. Горячкина по выражению [122]

$$k' = \frac{P}{ab}, \text{ Н/см}^2, \quad (5.17)$$

где P – общее сопротивление машины, замеренное динамометром или силовым датчиком.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Формула (5.17) является упрощенной, т.к. не учитывает влияние веса машины. Поэтому для более точных расчетов удельное сопротивление определяют из двухчленной формы рациональной формулы:

$$k' = \frac{P - f'G}{ab}. \quad (5.18)$$

Удельное сопротивление, рассчитанное по выражению (5.18) включает, в том числе, сопротивление трения полевых досок плуга о стенку борозды. Поэтому в ВИСХОМе был разработан специальный динамометрический плуг, в котором исключалось трение полевых досок [122].

Трудность обработки почв Н.В. Щучкин [136] и П.У. Бахтин [12] предложили классифицировать по величине удельного сопротивления. По Н.В. Щучкину все почвы разделяются по удельному сопротивлению на пять классов (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Классификация почв по величине удельного сопротивления

Почвы	Легкие	Средние	Тяжелые	Очень тяжелые
Удельное сопротивление, k , Н/см ²	До 3,0	5...7	7...12	12 и выше

В основу такой классификации положен механический состав почвы. При повышении влажности суглинистых и глинистых почв удельное сопротивление уменьшается на 20...60% (меньше у структурных, больше у бесструктурных почв).

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

На основании обширных исследований А.Ф. Пронин [107] составил соотношение пахотных площадей с различным удельным сопротивлением (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Удельное сопротивление k основных типов пахотных почв СССР
(по А.Ф. Пронину)

Почвенные зоны	Посевная площадь		Площадь почв с удельным сопротивлением, кгс/см ²									
			до 0,40		0,41-0,55		0,56-0,75		0,76-1,10		1,11-1,30	
	млн. га	% от общей	млн. га	% от всей по зоне	млн. га	% от всей по зоне	млн. га	% от всей по зоне	млн. га	% от всей по зоне	млн. га	% от всей по зоне
Подзолистые и дерново-подзолистые	40,0	18,2	5,7	14,3	1,8	44,8	10,3	25,8	5,4	13,6	0,6	1,5
Черноземные	158,2	72	14,7	9,3	61,1	38,5	60,1	37,9	19,8	12,5	2,8	1,8
Каштановые	12,5	5,7	2,9	23,0	4,7	37,6	3,7	29,5	1,2	9,8	0,01	0,1
Сероземы	6,2	2,8	0,6	9,8	1,6	25,7	2,7	43,9	1,3	20,6	-	-
Другие почвы	2,8	1,8	0,8	29,4	1,1	37,7	0,8	30,0	0,1	2,9	-	-
Итого:	220	100	32,1	14,6	85,4	38,8	73,3	33,5	26,2	11,9	2,6	1,2

На величину удельного сопротивления значительное влияние оказывает агрофон, т.е. степень задернелости и уплотнения предыдущими проходами машинно-тракторных агрегатов (МТА): диапазон изменчивости величины k может достигать более чем 2-3 раз.

Г.Н. Синееков рекомендовал за нормальное значение коэффициента k для данного поля принимать то, которое определено при вспашке под зерновые культуры на глубину, принятую в данной агротехнической зоне при влажности, соответствующей средней многолетней величине.

5.4. Косвенные методы определения силы тяги почвообрабатывающих машин

В.С. Волкановский [22] впервые предложил идею использовать для определения тягового сопротивления плугов косвенные показатели. По аналогии с металловедением, где широко применяются шкалы твердости для прочностных характеристик металлов, например, твердость по Бринеллю или Роквеллу и др., он предложил применять показатели твердости почвы для расчетов удельного сопротивления почвы. По его мнению, если отнести показатель твердости почвы, измеренный в горизонтальном направлении на глубине пахоты k_G к удельному сопротивлению почвы k , полученному по результатам динамометрирования, то коэффициент относительного сопротивления

$k_{OT} = \frac{k_G}{k}$ будет характеризовать энергоемкость того или иного орудия.

Его испытания показали, что несмотря на резкие колебания удельного сопротивления, для одного и того же плуга коэффициент относительного сопротивления k_{OT} остается практически неизменным (отклонения находились в пределах ошибки опыта). Поэтому В.С. Волкановский приходит к выводу: метод оценки энергоемкости плугов по относительным показателям удобен при испытаниях разных плугов.

М.Р. Морозов [80] поставил под сомнение наличие функциональной зависимости между твердостью почвы и ее сопротивлением при пахоте. По его мнению, это может быть только при пахоте почвы оптимальной влажности. Он также утверждал, что отсутствует идентичность между реакцией почвы на сопротивление плунжера твердомера и работой корпуса плуга.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

В другой статье М.Р. Морозов предложил для сопоставлений сопротивления плуга с показаниями твердомера относить последние не к площади сечения плунжера, а к объему деформированной им почвы, т.е. определять показатель твердомера в размерности Н/см³. По его мнению, твердомером определяется не твердость почвы, а сопротивление почвы вдавливанию плунжера, т.е. сопротивление почвы расклиниванию, обусловленное ее механической прочностью. Для показаний твердомера он предложил ввести термин «механическая прочность почвы», а механическую прочность надо определять не по всему пахотному слою, а только в нижней части на толщину 10 см. В этом случае коэффициент корреляции между удельным сопротивлением k , определенным прямым динамометрированием и показателем твердомера достигает $0,92 \pm 0,03$. На основании приведенных опытов, М.Р. Морозов считал, что на сухой почве, не прилипающей к рабочим органам плуга, существует функциональная связь между показаниями твердомера и динамометра. По величине предложенной им механической прочности можно судить о значении удельного сопротивления данной почвы. Показания твердомера можно использовать для получения данных об удельном сопротивлении почвы на больших площадях без прямого динамометрирования, что значительно экономичнее.

Н.А. Качинский [56, 57, 58] установил наличие высокой корреляции между твердостью почвы и ее удельным сопротивлением при относительной влажности в пределах 30...75%. Используя методы математической статистики по полученному уравнению регрессии он вычислил коэффициент удельного сопротивления при пахоте от твердости почвы. Удельное сопротивление, вычисленное по предложенной им формуле, оказалось очень близким к величине, определенной динамометрированием. Попытка использования показаний твердомеров

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

конструкции Горячкина и Качинского для определения удельного сопротивления почвы была предпринята Г.А. Николаевым [82]. Твердомер Горячкина применялся в двух вариантах: с коническим плунжером (площадь сечения цилиндрической части равна 1 см^2 при вертикальном расклинивании) и с лопатообразным плунжером при горизонтальном расклинивании. Твердомер Качинского погружался вертикально, он имел цилиндрический плунжер сечением 2 см^2 . Результаты испытаний показали, что величина твердости почвы по показаниям обоих твердомеров примерно соответствует величине удельного сопротивления почвы при вспашке, полученной динамометрированием. Коэффициенты корреляции между $k = \frac{P}{ab}$ и сопротивлением расклиниванию почвы твердомерами приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3
Результаты опытов с различными твердомерами

Наименование твердомера	Коэффициент корреляции	Ошибка коэффициента корреляции, %
Системы Качинского	0,67	$\pm 0,10$
Системы Горячкина: - вертикальное внедрение - горизонтальное расклинивание	0,79 0,078	$\pm 0,06$ $\pm 0,07$

На основании результатов этих опытов Г.А. Николаев делает вывод, что при оптимальных условиях пахоты, когда отсутствует залипание, показатели твердомеров Горячкина и Качинского при достаточном количестве опытов имеют значительную корреляцию с данными динамометрирования плуга.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Наиболее полно и детально обосновал метод определения удельного сопротивления плугов по показателям твердомера без динамометрирования Н.В. Щучкин [136]. Он предложил формулу

$$P = fG + m'p_{CP}ab, \quad (5.19)$$

где p_{CP} – средняя твердость почвы на глубине пахоты; m' - коэффициент перехода от физико-механических свойств почвы к тяговому сопротивлению плуга.

Проанализировав многочисленные работы своих предшественников, Н.В. Щучкин пришел к выводу, что на удельное сопротивление почвы при вспашке влияют: механический состав почвы, ее структурность, влажность, агрофон, предшествующая обработка, засоренность сорняками. Однако из всех физико-механических свойств почвы ее твердость представляет комплексный показатель, который наиболее полно характеризует «полезное» сопротивление при вспашке. Вторым показателем, характеризующим «вредное» сопротивление плуга является коэффициент трения почвы по металлу. В опытах Н.В. Щучкина твердость определялась твердомером Горячкина. Коэффициент трения почвы по металлу определялся прибором Г.Н. Синеокова.

Для нахождения переводного коэффициента m' приравняем два первых члена рациональной формулы Горячкина (5.16) правой части уравнения (5.19) и получим

$$fG + kab = m'p_{CP}ab, \quad (5.19)$$

откуда значение коэффициента

$$m' = \frac{k}{p_{CP}}, \quad (5.21)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

где $k = \frac{P - fG}{ab}$; P – тяговое сопротивление плуга, определяемое прямым

динамометрированием.

Среднее значение коэффициента m' при отсутствии залипания рабочих органов по данным Н.В. Щучкина составляет $m' = 0,011 \dots 0,017$, при залипании корпусов плуга почвой $m' = 0,030$.

При горизонтальном расклинивании почвы переоборудованным твердомером Горячкина (с плунжером в форме клина) коэффициент m' определялся по формуле

$$m' = \frac{k}{P_{10} + P_{20}}, \quad (5.23)$$

где P_{10} и P_{20} – сопротивление почвы расклиниванию на глубине 10 см и 20 см.

Среднее значение коэффициента m' было равно 0,022.

Опыты по горизонтальному расклиниванию почвы достаточно трудоемки и менее практичны по сравнению с вертикальным внедрением твердомера.

На основании результатов исследований Н.В. Щучкин считает, что, имея достоверные значения коэффициента m' , можно вычислить тяговое сопротивление плугов и потребную мощность трактора без динамометрирования, при заданной глубине пахоты, весе и ширине захвата плуга, ограничиваясь лишь определением коэффициента f и твердости почвы. Однако автор оговаривается, что сопротивление плуга будет соответствовать двухчленной формуле Горячкина и при скорости движения не превышающей 1,5 м/с.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

С критикой метода Н.В. Щучкина выступила С.В. Амплевская [2], которая полагала, что деформация почвы плунжером твердомера не соответствует деформации почвы корпусом плуга. Для косвенного определения сопротивления почвы при вспашке она предложила уменьшенную модель плуга. Однако, метод С.В. Амплевской не нашел практического применения из-за трудоемкости опытов и необходимости введения переходного коэффициента между сопротивлением модели плуга и реальным плугом.

Н.В. Щучкин приводит следующие данные по удельному сопротивлению и переходному коэффициенту m' для некоторых типов почв (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Значения удельного сопротивления плугов и коэффициента m'

Тип почвы	Агрофон	Влажность на глубине 0 – 10 ,% 10 – 20	f	p_{CP} , кг/см ²	Удельное сопротивление, кгс/см ²		m'
					Общее, k	Полезное, k_1	
Серая лесостепная	Жнивье	27	0,50	25	0,48	0,29	0,012
		29					
Выщелоченный чернозем	Люцер-нище	22	0,70	37	0,68	0,49	0,013
		26					
Тучный чернозем	Залежь	34	0,77	15	0,48	0,23	0,015
		29					
Серая лесостепная	Клевери-ще	19	0,68	22	0,45	0,25	0,012
		34					
Серая лесостепная	Жнивье	32	0,68	15	0,44	0,22	0,015
		27					

Из данных таблицы следует, что величина коэффициента m' достаточно стабильна для исследуемых почв – отклонение не превышает 7...14%. Поэтому, используя величину этого коэффициента, можно по величине твердости почвы рассчитывать сопротивление плуга по формуле (5.19).

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Необходимо отметить, что предложенный Н.В. Щучкиным метод косвенного определения тягового сопротивления плугов имеет существенный недостаток: он не учитывает скорость движения плуга. Твердость почвы, определяемая твердомерами Горячкина, Качинского или конструкции ВИСХОМ имеет статическую природу, она не учитывает скорость приложения нагрузки. Поэтому формулы Н.В. Щучкина не учитывают третий член рациональной формулы Горячкина. В то же время, многочисленные опыты показывают, что сопротивление почвообрабатывающих машин существенно зависит от рабочей скорости. Поэтому в механике почвогрунтов для классификации грунтов по трудности обработки используют динамические твердомеры, например, ударник ДорНИИ [47], который измеряет твердость грунта при ударном погружении цилиндрического стержня под действием падающего груза.

По мнению А.Н. Зеленина [49] основой процесса резания грунтов является пластическая деформация, характер протекания которой зависит, главным образом, от скорости приложения нагрузки: «...при быстром протекании нагрузки наступает момент, когда внутренние напряжения не успевают уравновеситься с внешней нагрузкой, деформации отстают от задаваемых нагрузок и происходит замедление течения и уменьшение величины деформаций, т.е. наблюдается как бы повышение временного сопротивления грунтов». Такая картина деформации грунтов с увеличением скорости нагружения подтверждается реологическими моделями (см. ниже). Поэтому А.Н. Зеленин считает, что число ударов, необходимое для погружения плунжера на определенную глубину, прямо пропорционально усилию резания грунтов и может служить шкалой оценки их прочности. Со своей стороны полагаем, что динамическое погружение ударника в наибольшей степени отвечает условиям работы клинообразных рабочих органов почвообрабатывающих машин. Поэтому,

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

по аналогии с гипотезой Н.В. Щучкина, тяговое сопротивление почвообрабатывающих машин предлагаем определять по формуле

$$P = fG + ncab, \quad (5.24)$$

где n – переводной коэффициент показателей статического и динамического твердомеров; c – число ударов ударника ДорНИИ для соответствующей глубины обработки.

Переводной коэффициент определится из соотношения

$$n = \frac{c}{p_{CP}}. \quad (5.25)$$

По данным [48, 49] между числом ударов динамического ударника c и показателями твердости p_{CP} статического твердомера имеется линейная зависимость (рис. 5.4).

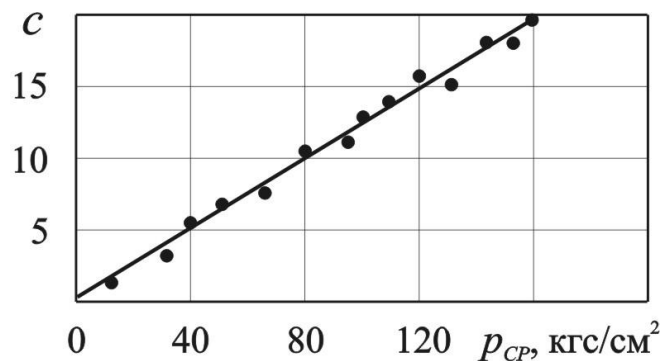


Рис. 5.4. Зависимость между показателями статического и динамического твердомеров

Из графика следует, что

$$c = 0,125p_{CP}. \quad (5.26)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Зависимость (5.26) позволяет определять переводной коэффициент n , а по нему тяговое сопротивление почвообрабатывающей машины по уравнению (5.24). Например, при $a = 20$ см; $b = 175$ см; $c = 5$; $f = 0,5$ и $G = 1000$ кгс имеем $P = 0,5 \cdot 1000 + 0,125 \cdot 5 \cdot 20 \cdot 175 \approx 2680$ кгс.

Благодаря цикличности образования тел скольжения (стружек), соответствующих чередованию фаз сжатия-сдвига усилие резания представляет собой периодическую функцию (рис. 5.5).

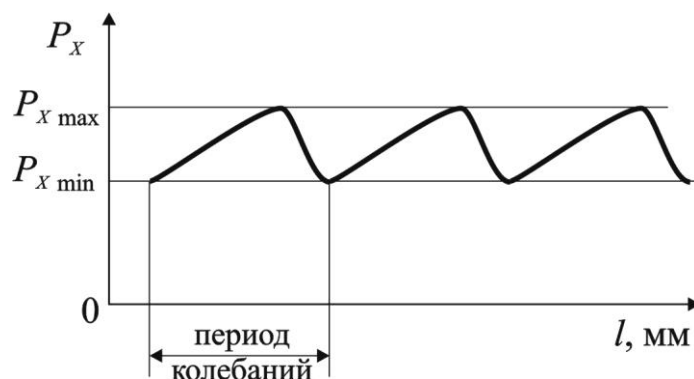


Рис. 5.5. Колебания силы резания почвы при отделении элементов стружки

Диапазон колебаний величины силы резания достигает 1,5...2 раз от среднего значения, а период колебаний l зависит от типа стружки (элементная или ленточная). Частота колебаний P_x определяется по уравнению (4.16) и зависит от скорости движения и длины l скальваемой стружки.

Размеры элементов стружки, образующейся под воздействием клинообразного рабочего органа можно определить на основании теории предельного равновесия сыпучей среды, обладающей сцеплением и внутренним трением (метод В.В. Соколовского [124]). Примем, что

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

сопротивление смятию почвы клином пропорционально объему деформируемой почвы (рис. 5.6), т.е.

$$\bar{P} = \bar{Q}, \quad (5.27)$$

где $\bar{P}$ - сопротивление почвы резанию; $\bar{Q}$ - усилие сжатия почвы до образования тела скольжения (стружки).

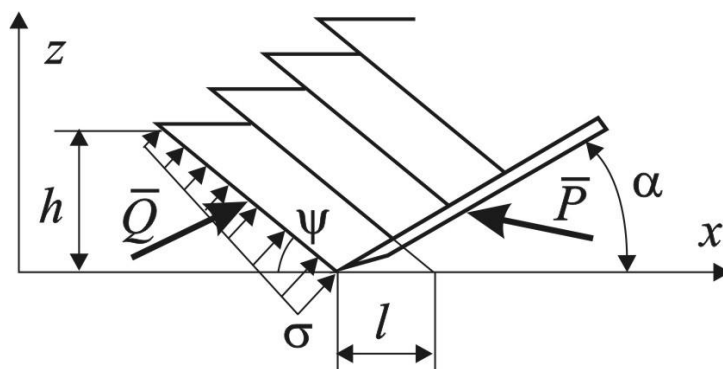


Рис. 5.6. Схема сил, действующих на элемент почвенной стружки (по С.П. Соловьеву)

Сила P эквивалентна силам, действующим на переднюю грань клина в состоянии предельного равновесия почвы и является линейной функцией нормальных напряжений на элементарной площадке клина

$$dP = \sigma_0 dx dz / \cos \varphi_B = dx dz / (\cos \varphi_B \cos \psi), \quad (5.28)$$

где $\sigma_0 = A(\rho x + c \operatorname{ctg} \varphi_B)$ - предельное нормальное напряжение в соответствии с теорией предельного равновесия; A - коэффициент для углов $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$ принимают равным

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$A = \frac{\cos^2 \varphi_B}{1 - \sin \varphi_B} e^{(\frac{3}{2}\pi - 2\psi + \varphi_B) \operatorname{tg} \varphi_B}; \quad \rho - \text{плотность почвы; } c - \text{сцепление}$$

почвы; ψ - угол скалывания; φ_B и φ - углы внутреннего и внешнего трения; dx и dz – координаты элементарной площадки.

$$\text{Тогда } dP = \frac{A}{\cos \varphi_B \sin \psi} (\rho x + c \operatorname{ctg} \varphi_B) dx dz, \text{ откуда}$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{A}{\cos \varphi_B \sin \psi} \int_0^B \left\{ \int_0^h (\rho x + c \operatorname{ctg} \varphi_B) dx \right\} dz = \\ &= \frac{A}{\cos \varphi_B \sin \psi} Bh \left(\frac{\rho h}{2} + c \operatorname{ctg} \varphi_B \right), \end{aligned}$$

где B и h – соответственно ширина и глубина резания.

Усилие сжатия почвы равно

$$Q = \frac{qV}{\cos \varphi}, \quad (5.29)$$

где q – коэффициент объемного смятия почвы; V – объем сминаемой почвы.

После подстановки величины объема V получим

$$Q = \frac{ql^2 B \cos \alpha \sin \alpha}{2 \cos \varphi}, \quad (5.30)$$

где α - угол резания клина.

После подстановок в уравнение (5.29) значений P и Q и интегрирования получим

$$l = \sqrt{\frac{2Ah \left(\frac{\rho h}{2} + c \operatorname{ctg} \varphi_B \cos \varphi \right)}{q \cos \varphi \sin \psi \cos \alpha \sin \alpha}}. \quad (5.31)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Из уравнения (5.31) следует, что линейный размер элемента стружки l прямо пропорционален глубине резания h , коэффициенту сцепления c и углу внутреннего трения φ_B и обратно пропорционален коэффициенту объемного смятия почвы q , углу внешнего трения φ , углу скалывания ψ и углу резания клина α .

Размер элемента стружки может служить ориентировочным показателем степени крошения почвы.

Экспериментальные данные по определению силы резания и размера l показаны на рис. 5.7.

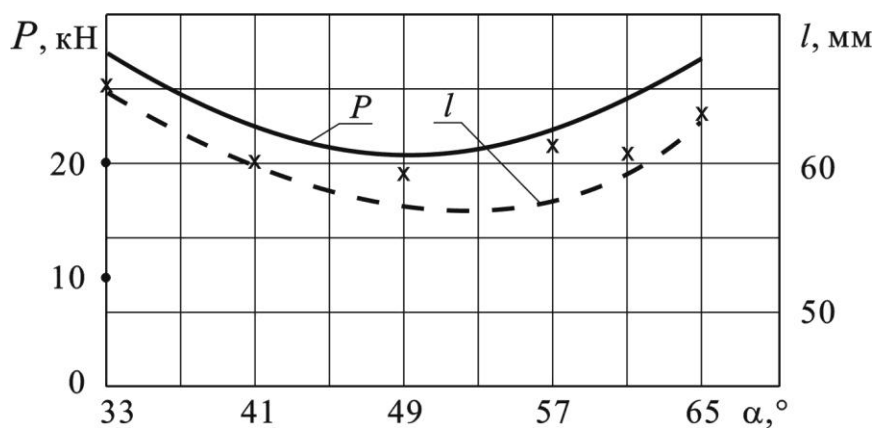


Рис. 5.7. Зависимость силы резания P и размеров элемента стружки l от угла резания клина α (по данным С.П. Соловьева)

Здесь необходимо отметить, что по обобщенным нами данным других исследований минимальная сила резания P достигается при угле резания плоского клина $\alpha = 17^\circ \div 35^\circ$. При анализе таких данных необходимо учитывать соотношение глубины резания, высоты и длины клина. При оптимальных соотношениях высоты и длины клина сила резания P_{min} достигается при $\alpha = 7^\circ \div 15^\circ$.

Глава 6. Динамические процессы механики почв

6.1. Влияние скорости на взаимодействие рабочих органов с почвой

Принятая нами модель почвы как трехфазного полидисперсного образования предполагает наличие у нее упругих, пластичных и вязких свойств. Это означает, что поведение почвы в процессе деформирования зависит не только от абсолютных значений напряжений и деформаций, но и от величин их производных по времени, т.е. от скорости приложения нагрузки. Исследования А.Н. Гудкова, В.И. Виноградова, Ю.Ф. Новикова, М.Д. Подскребко, В.В. Кацыгина, М.Е. Мацепуро, Е.Н. Азямовой, В.П. Станевского, А.Н. Зеленина, Nichols [147], Sohne [148] и многих других показали, что с повышением рабочих скоростей почвообрабатывающих машин изменяется механика взаимодействия рабочих органов с почвой: повышаются прочностные характеристики почвы, возникают дополнительные динамические составляющие сопротивления резанию, увеличиваются общие энергозатраты, изменяется качество обработки почвы, в том числе степень крошения.

Разделение физических тел, в том числе и почвогрунтов, на пластичные и хрупкие достаточно условно. Так, хрупкое тело при всестороннем сжатии проявляет пластичные свойства, а такое абсолютно пластичное тело как вода, подвергнутая деформации с большой скоростью, например, летящей пулей, разрушается хрупким образом [70]. По мнению А.Н. Зеленина [48] хрупкость и пластичность – это не свойства физических тел, а их состояние, проявляемое в определенных условиях и зависящее, прежде всего, от скорости нагружения.

В общем случае, нагружение физического тела внешней нагрузкой может иметь статический и динамический характер. При статическом

нагружении внешние силы остаются постоянными в течение длительного времени, при этом все нагруженное тело находится в напряженно-деформированном состоянии. При динамическом нагружении или ударе внешние силы изменяют свою величину за короткий промежуток времени, а действие ударной нагрузки не передается на все тело, а только на его некоторую локальную часть, находящуюся непосредственно в контакте с ударником. От нагруженной части тела в этом случае распространяются волны напряжений и деформаций, создавая волновой процесс в нагруженном теле [109].

Для характеристики вида нагружения служит скорость деформации, которая определяется в общем случае тензором скоростей

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d}{dt}(\varepsilon), \quad (6.1)$$

где ε - величина деформации.

Для одноосной деформации скорость деформации равна

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (6.2)$$

Так как $\varepsilon = \frac{\Delta}{l}$, где Δ - перемещение, l – первоначальная длина

образца, то $\dot{\varepsilon} = \frac{1}{l} \cdot \frac{d\Delta}{dt}$.

С учетом того, что скорость перемещения равна $v = \frac{d\Delta}{dt}$, получим

$$\dot{\varepsilon} = v/l. \quad (6.3)$$

Отсюда следует, что характер процесса нагружения можно оценить скоростью приложения нагрузки.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

С увеличением рабочей скорости, как свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные [23, 24, 103 и др.] увеличиваются энергозатраты на обработку почвы. Например, по данным А.Н. Зеленина [47] с увеличением скорости удельное сопротивление резанию грунта растет по квадратичной кривой (рис. 6.1). На этот факт обратил внимание еще В.П. Горячкин [33], о чем свидетельствует третий скоростной член рациональной формулы силы тяги. Однако, он полагал, что увеличение силы тяги плугов с увеличением скорости идет на более дальний отброс пласта, а не на дополнительную деформацию почвы. Последующие исследования [19, 125] показали, что кроме кинематических факторов (более дальний отброс пласта), увеличение силы тяги объясняется рядом других физических факторов.

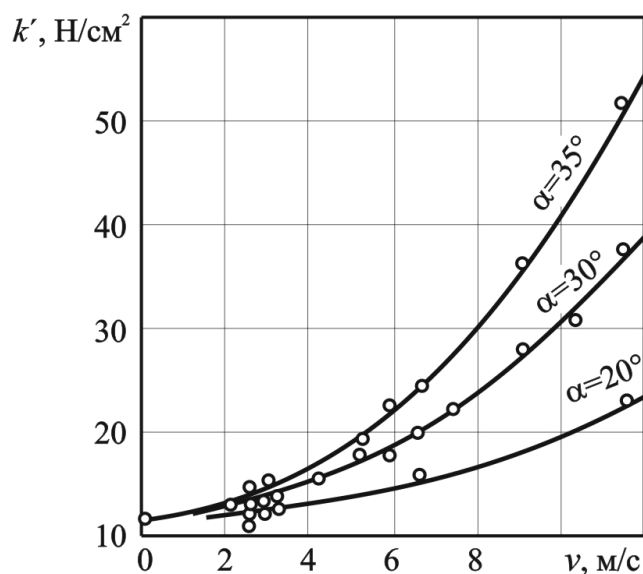


Рис. 6.1. Зависимость удельных сопротивлений почвы от скорости и угла резания

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

А.Н. Гудков [37] представляет почвенный пласт в виде объемной твердой решетки, заполненной жидкими и газообразными подвижными веществами. В зависимости от соотношения трех основных фаз, почва может принимать свойства вязких, пластичных и хрупких тел. При обработке почвы проявление того или иного свойства зависит не только от ее состава, но и от скоростей приложения деформаций и напряжений. Он считает, что в результате деформации твердые элементы почвы производят давление на окружающие их воду и газы и заставляют их перетекать в менее напряженные зоны, а также в межагрегатные полости. Сопротивление, которое оказывает перетекающая водно-воздушная среда, будет зависеть от скорости ее перемещения и от площади поперечного сечения каналов между твердыми частицами. При увеличении скорости воздействия рабочих органов на почву сопротивление водно-воздушной среды будет возрастать, что приведет к увеличению общего сопротивления при обработке почвы. А.Н. Гудков ограничился общими соображениями о причинах повышения сопротивления резанию почвы, не приводя каких-либо конкретных расчетов.

Таким образом, можно считать установленным, что реальные почвы деформируются не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени, благодаря многофазному строению, в том числе, пористости и сложной природе сил сцепления.

Под действием внешней силы в почве происходят перемещения твердых частиц, изменение их ориентации, вытеснение водной и газообразной фаз из пор и т.п. В результате этих физических процессов деформирование почвы происходит с конечной скоростью. Из этого следует важный вывод: при малой скорости нагружения почва успевает деформироваться и рабочий орган перемещается в уже разрушенной среде. Если же скорость нагружения больше скорости деформации, то рабочему

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

органу приходится перемещаться в еще не разрушенной среде, преодолевая дополнительное сопротивление [19]. Многочисленные экспериментальные данные [69, 88, 103] дают основания полагать, что среднеувлажненные почвы представляют собой нелинейную упруго-пластично-вязкую среду. Нелинейность такой среды проявляется в изменении интенсивности нарастания напряжений с увеличением деформации, упругость – в наличии у почвы обратимых, восстанавливающихся деформаций, пластичность – в развитии необратимых деформаций, вязкость – в способности развивать деформации во времени. Все перечисленные свойства (упругость, пластичность, вязкость и их сочетания) относятся к фундаментальным свойствам реальных почв и их принято анализировать на реологических моделях.

В.П. Горячкин [34] неоднократно отмечал, что процесс воздействия рабочих органов на почву в редких случаях протекает статически, что разница между ударным и статическим воздействием достаточно условна. Анализ диаграмм (осциллограмм) позволяет выделить две компоненты сопротивления: одну в виде медленно изменяющейся (квазистатической), представленной в рациональной формуле произведением удельного сопротивления на поперечное сечение пласта $P_{СТ} \approx kab$, и динамической составляющей P_d , соответствующей ударному воздействию рабочих органов на почву [106]. Квазистатическая компонента определяет средний уровень рабочих сопротивлений медленно изменяющихся с течением времени, с частотой на порядок ниже собственных частот колебаний рабочих органов и элементов конструкций почвообрабатывающих машин. Как было установлено выше, частота квазистатической компоненты не превышает 12...20 Гц. Динамическая компонента имеет более высокие частоты 20...50 Гц.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Возникновение сопротивления почвы на рабочих органах В.П. Горячкин рассматривал как суммарное воздействие толчков или ударов почвенных частиц. Поэтому меру воздействия рабочих органов на обрабатываемый материал он предложил определять через импульс силы

$$P_o = P\Delta t = m\Delta v = \Delta\mu\Delta v,$$

где Δt – время действия силы; m – масса машины; $\Delta\mu$ – конечная масса обрабатываемого материала; Δv – скорость, сообщаемая массе.

Далее В.П. Горячкин связал действие импульса с силой сопротивления $P\Delta t = \int_0^S Rdt = \int_0^{\Delta S} R\Delta S$ и мощностью

$$75N\Delta t = \frac{m\Delta v^2}{2} = \int_0^{\Delta S} R\Delta S, \text{ расходуемой на пути } \Delta S.$$

Л.В. Погорелый [106] со ссылкой на С.В. Кардашевского так поясняет образование динамической компоненты сопротивления (рис. 6.2).

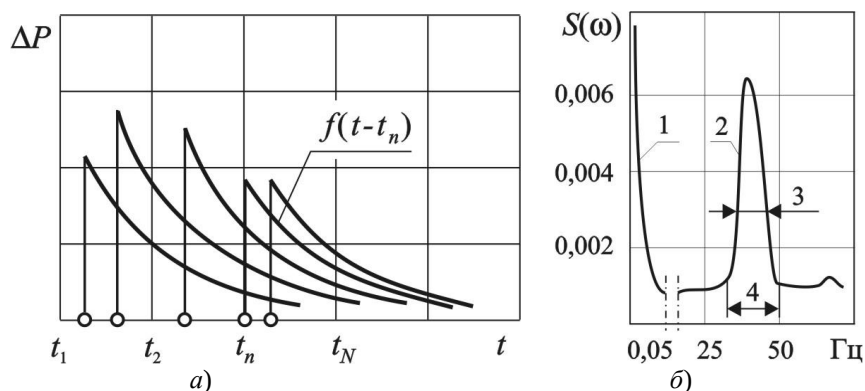


Рис. 6.2. Схема образования динамической компоненты ΔP (а) и спектральная плотность $S(\omega)$ (б) сопротивления стрелчатой лапы в песке:
1 – квазистатическая составляющая; 2 – динамическая составляющая;
3 и 4 – флуктуации соответственно фазы и амплитуды колебаний

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Элементарная площадка рабочей поверхности рабочего органа воспринимает множество элементарных детерминированных импульсов, затухающих, например, по закону e^{-at} (рис. 6.2, а). Учитывая статистическую природу характеристик почвы, такой процесс на макроскопическом уровне наблюдается как осредненный процесс с корреляционной функцией $R_{\Delta P_{CT}}(\tau) = a^2 e^{-2\lambda|\tau|}$ и плотностью распределения $S(\omega)$ (рис. 6.2, б), где a^2 – средний квадрат амплитуды толчков; λ – интенсивность толчков, распределенных в общем случае по элементарным площадкам рабочего органа по закону Пуассона.

6.2. Элементарная теория удара

Используя положение В.П. Горячкина об импульсе А.Н. Гудков [38] определил время воздействия корпусов плуга на почву по формуле

$$Rt = mv = \frac{G}{g} v \text{ и } t = \frac{G}{g} \frac{v}{R},$$

где G – вес плуга; R – сопротивление плуга; v – скорость движения, или

$$t \approx 0,1 \frac{G}{R} v. \quad (6.4)$$

Для прицепного плуга весом $G=1260$ кгс при вспашке почвы с удельным сопротивлением $k=0,5$ МПа и $R=23650$ Н на скорости $v=1,3$ м/с

$\frac{G}{R}=0,533$. Следовательно, $t \approx 0,07$ с.

По расчетам А.Н. Гудкова для отношения $\frac{G}{R}=0,5\dots 0,7$ и скорости $v=1,5\dots 2,0$ м/с время взаимодействия будет составлять от $t = 0,07\dots 0,1$ с.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Это свидетельствует о том, что период времени, при котором плуг преодолевает сопротивление почвы, составляет очень малую величину. Поэтому процесс вспашки даже на малых рабочих скоростях 1,2...2,0 м/с (4,3...7,2 км/ч) носит ударный характер. Такое понимание процесса удара вполне согласуется с его современной трактовкой: при ударе двух тел не только изменяются их скорости, но и их кинетическая энергия, которая частично или полностью переходит в энергию упруго-пластического деформирования [3].

Нагружение, и соответственно деформации, считаются динамическим, если их скорость превышает некоторую критическую $v_{кр}$, при которой в разрушаемом материале возникают остаточные (необратимые) деформации [51].

На основании положений элементарной теории удара определим критическую скорость удара для почвы [61]. Рассмотрим соударение рабочего органа массой m_1 с комком почвы массой m_2 . В первом приближении будем рассматривать соударение рабочего органа и комка как удар двух свободных упругих стержней, имеющих соответственно скорости движения v_1 и v_2 (причем $v_1 > v_2$), модули упругости E_1 и E_2 , длины стержней l_1 и l_2 , площади поперечного сечения F_1 и F_2 . Изменение кинетической энергии обоих тел при ударе найдем по теореме изменения количества движения, полагая, что коэффициент восстановления $k_B=0$ и приравнивая кинетическую энергию работе деформации стержней

$$\Delta T = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2 = \frac{\sigma_1^2 F_1 l_1}{6E_1} + \frac{\sigma_2^2 F_2 l_2}{6E_2}. \quad (6.5)$$

Полагая, что скорость комка почвы $v_2=0$, а масса m_1 и жесткость E_1 рабочего органа бесконечно велики по сравнению с соответствующими величинами комка почвы, найдем

$$\sigma_2 = v_1 \sqrt{\frac{3m_2 E_2}{F_2 l_2}} = v_1 \sqrt{3\rho E_2} . \quad (6.6)$$

Подставляя в выражение (6.6) предельное значение напряжения текучести σ_T , можно получить предельное значение скорости соударения, при которой в комке почвы будут возникать остаточные деформации

$$v_{кр} = \sigma_T \sqrt{\frac{1}{3\rho E}} . \quad (6.7)$$

Из уравнения (6.7) следует, что плотные почвы (с повышенным объемным весом) разрушаются при меньших скоростях удара, а менее плотные почвы выдерживают более высокие скорости. Так, по данным А.Н. Гудкова [38] сухая бесструктурная почва разрушается при скорости 1,08 м/с, а почва средней плотности – при скорости 0,87 м/с. В приведенных рассуждениях не учтено то обстоятельство, что с увеличением скорости нагружения прочность почвы возрастает (см. ниже). Поэтому приведенные величины критической скорости являются наименьшими, при которых напряжения могут выйти за пределы упругости.

В.П. Горячкин и вслед за ним А.Н. Гудков справедливо считали, что при ударном воздействии рабочих органов на почву для ее разрушения необходимо, чтобы продолжительность удара Δt была равна или больше времени, требующегося для распространения волны деформации от места удара до внешней поверхности пласта. Если продолжительность удара будет меньше этого времени, то весь пласт почвы не успеет деформироваться и действие удара ограничится местным разрушением. Поэтому при ударе величина сжатия или амплитуда при волновом процессе a_i должна превышать предел упругой деформации, т.е.

$\Delta t \geq \frac{\pi}{2} - \frac{a_i}{v}$. Если принять скорость распространения продольной волны

деформации C , то продолжительность удара Δt при длине деформируемого тела l будет равна [34]

$$\Delta t = \frac{\pi}{2} \frac{l}{C}. \quad (6.7)$$

А.Н. Гудков рассчитал, что при вспашке на глубину $a = 27$ см, при угле наклона лемеха к дну борозды $\alpha = 30^\circ$, угле трения $\varphi = 25^\circ$, при $C = 1500$ м/с (для бесструктурных почв), необходимая продолжительность удара составит $\Delta t = 0,00049$ с. Для структурных почв необходимая продолжительность удара может быть значительно меньше из-за меньшей скорости распространения волны деформаций в таких почвах.

Ряд вопросов ударного взаимодействия упругих и не вполне упругих тел был решен Н.А. Кильчевским [59] на основе контактной теории удара Герца. Полученные им решения в основном носят характер качественного описания процессов удара и пока мало использовались исследователями при анализе процессов разрушения почв. Теория удара для упруго-пластических тел, разработанная Н.А. Кильчевским, имеет следующую механическую интерпретацию. Поведение двух упругих тел в процессе удара можно уподобить движению двух материальных точек с массами M_1 и M_2 , соединенных упругим элементом, имеющим линейную характеристику (рис. 6.3).

Предположим, что при движении указанных материальных точек вдоль оси OZ в положительном направлении скорость v_1 точки M_1 превышает скорость v_2 точки M_2 . Расстояние между точками в начальный момент времени t_0 равно

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$d = z_2 - z_1 = z_{20} - z_{10} - \Delta z, \quad (6.8)$$

где Δz – сближение точек M_1 и M_2 , равное деформации пружины или локальной деформации тел при соударении.

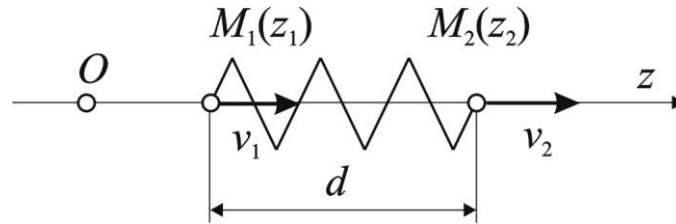


Рис. 6.3. Механическая модель удара двух упругих тел

Уравнения движения точек M_1 и M_2 имеют вид

$$M_1 \frac{d^2 z_1}{dt^2} = -P; \quad M_2 \frac{d^2 z_2}{dt^2} = P, \quad (6.9)$$

где P – проекция главного вектора сил взаимодействия точек по оси OZ .

Дифференцируя уравнение (6.8), находим

$$\frac{d^2 z_2}{dt^2} - \frac{d^2 z_1}{dt^2} = -\frac{d^2 \Delta z}{dt^2}. \quad (6.10)$$

Тогда с учетом уравнений (6.9) получим

$$M \frac{d^2 \Delta z}{dt^2} = -P, \quad (6.11)$$

где $M = \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2}$.

Уравнение (6.11) является исходным в теории удара Герца.

Зависимость между сжатием пружины Δz и силой P имеет вид

$$P = k_B \Delta z^{\frac{3}{2}}, \quad (6.12)$$

где k_B – коэффициент восстановления.

Выражение (6.12) можно использовать при изучении удара упругих тел, когда продолжительность удара незначительно превышает время прохождения прямой и обратной упругих волн в соударяющихся телах.

Из изложенного следует, что в классической теории удара не учитываются пластические деформации в месте контакта тел. При рассмотрении соударения не вполне упругих тел необходимо учитывать, что при расчете предела упругости общая деформация будет состоять из упругой и пластической, и что при разгрузке пластическая деформация сохраняется. В таких случаях, согласно эмпирическому закону Герстнера [51] принимается, что упругие деформации при разгрузке развиваются независимо от пластических. Тогда зависимость между упругой и пластической частями местной деформации и сжимающей силой будет выражаться

$$\Delta z = k_1 P^{\frac{2}{3}} + k_2 P, \quad (6.13)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, учитывающий упругие свойства тела; k_2 – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

Более простые решения можно получить, рассматривая удар тела сферической формы радиуса R и массой M со скоростью v о пластическую среду со свободной плоской поверхностью. В этом случае упругая часть деформации отсутствует, коэффициент $k_2 = (2\pi R \sigma_T)^{-1}$, а уравнение движения примет вид

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$\Delta \ddot{z} = \frac{2\pi R \sigma_T}{M} \Delta z. \quad (6.14)$$

Решение этого уравнения дает

$$\Delta z = v \sqrt{\frac{MR \sigma_T}{2\pi}} \sin \sqrt{\frac{2R \sigma_T}{M}} t.$$

Максимальная деформация пластического тела равна

$$\Delta z_{\max} = v \sqrt{\frac{M}{2\pi R \sigma_T}}, \quad (6.15)$$

что соответствует продолжительности контакта

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{M}{2\pi R \sigma_T}}, \quad (6.16)$$

где σ_T – предельное напряжение текучести.

При ударном воздействии рабочих органов на почву, например, корпуса плуга, для разрушения пласта необходимо, чтобы продолжительность удара t равнялась или превышала время распространения волны напряжений от места удара до внешней плоскости пласта [38]. Если продолжительность удара меньше времени t , то волна деформаций не дойдет до внешней плоскости пласта, и он не успеет деформироваться на всю толщину, а будет наблюдаться лишь локальное разрушение в месте контакта. Поэтому при ударе величина Δz должна превышать предел пластической деформации для почвы.

Для ориентировочной оценки величины остаточных (пластических) деформаций, приводящих к разрушению почвы примем, что при ударе ножа ротационной почвообрабатывающей машины, радиус лезвия которого равен $r = 1$ мм, приведенная масса всех вращающихся

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

масс равна $m_{\text{ПР}} \approx 500$ кг, скорость соударения с почвой изменяется в пределах 5...10 м/с. Тогда для почв средней прочности с удельным сопротивлением $k = 0,5$ МПа Δz_{max} по уравнению (6.15) будет равно 0,05...0,12 м, что значительно превосходит пределы пластической деформации почвы.

6.3. Волновая теория удара

Как установлено выше, при ударном воздействии рабочих органов на почву, в последней возникают волны напряжений и деформаций. Наглядное представление о возникновении колебаний в ударяемом теле можно получить на схеме рис. 6.4.

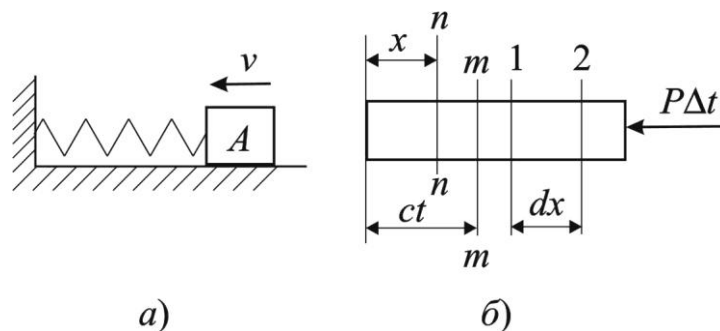


Рис. 6.4. Схема к определению скорости упругих деформаций

6.3.1. Упругие колебания в почве

Рассмотрим удар тела A об упругое полубесконечное тело, которое условно можно представить в виде пружины (рис. 6.4, а). При ударе сжатие начальных витков пружины будет передаваться следующим виткам со скоростью упругой деформации, удар будет продолжаться до

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

тех пор, пока сжатие витков не достигнет неподвижной опоры. После этого пружина будет разжиматься и начнутся ее колебания. Амплитуда колебаний a может быть определена из выражения [34]:

$$v = a\omega = \frac{2\pi a}{T}, \quad (6.17)$$

где v – скорость удара; ω – частота колебаний; T – период колебаний.

Продолжительность удара равна четверти периода колебаний, поэтому:

$$v = \frac{\pi a}{2\Delta t}. \quad (6.18)$$

Скорость распространения упругих колебаний определим из схемы рис. 6.4, б.

Рассмотрим выделенный из массива почвы полубесконечный стержень, к одному из концов которого приложен ударный импульс $P\Delta t$. Ударное нагружение стержня вызовет в нем волны возмущений или напряжений интенсивностью σ . Стержень, подвергнутый ударному нагружению, вначале испытывает упругую деформацию и передает ее в виде волн упругих колебаний, а затем вслед за упругими колебаниями возникают волны пластических деформаций. Кроме продольных упругих и пластических волн деформаций в стержне возникают поперечные волны сжатия или волны Релея [20], но они распространяются значительно медленнее первых и не оказывают большого влияния на напряженно-деформированное состояние стержня [109]. При интерференции продольных волн, напряжения в отдельных местах тела могут суммироваться и достигать предельных значений для прочности данного материала.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Скорость распространения продольных упругих волн можно определить на основе волновой теории удара по схеме на рис. 6.4, б. После приложения ударного импульса силы $P\Delta t$ через промежуток времени t участок стержня длиной $C_y t$ (здесь C_y - скорость упругих волн) будет равномерно сжат или растянут в зависимости от направления силы P , остальная часть стержня останется не напряженной. Сечение $m-m$ является фронтом упругой волны. Сечение $n-n$ с координатой x отстоит от фронта упругой волны на расстоянии $C_y t - x$. Этот участок равномерно сжат (или растянут) напряжением σ , а его относительная деформация равна $\varepsilon = \sigma / E$. Смещение деформированного сечения от начального положения равно

$$\Delta l = \varepsilon(C_y t - x) = \frac{\sigma}{E}(C_y t - x). \quad (6.19)$$

Дифференцируя последнее равенство по времени, найдем:

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{\sigma C_y}{E}. \quad (6.20)$$

Для определения скорости распространения фронта упругой волны рассмотрим сечения стержня 1-1 и 2-2 длиной $dx = C_y dt$. Упругие волны проходят через сечение 1-1 в момент времени t , а через сечение 2-2 в момент времени $t + dt$. В начальный момент сечение dx было в покое, а в момент $t + dt$ оно движется со скоростью v . Применяя к выделенному участку dx закон изменения количества движения, получим:

$$v\rho F dx = v\rho F C_y dt, \quad (6.21)$$

где F – площадь поперечного сечения стержня.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Приравнивая импульс силы изменению количества движения, имеем

$$\sigma = v\rho C_y. \quad (6.22)$$

Решая последнее уравнение совместно с уравнением (6.20), получим

$$C_y = \sqrt{E/\rho}. \quad (6.23)$$

Расчеты по формуле (6.23) показывают, что с увеличением плотности среды ρ скорость упругих волн увеличивается. При этом одновременно растет величина модуля упругости E . Используя экспериментальные данные по определению модуля упругости [68] и различные значения плотности почвы, В.А. Юзбашев [137] определил скорость распространения упругих волн в зависимости от модуля упругости E и плотности ρ тяжелосуглинистого чернозема. Следует отметить, что плотность соответствовала широкому диапазону состояния почвы: от естественного сложения до вспаханного поля (рис. 6.5).

Из графиков рис. 6.5 следует, что с увеличением плотности почвы скорость упругих волн увеличивается по параболической зависимости. При плотности почвы $1,15 \dots 1,35 \text{ г/см}^3$, соответствующей плотности вспаханного поля, скорость упругих волн $C_y = 90 \dots 95 \text{ м/с}$. С повышением плотности до $1,4 \dots 1,6 \text{ г/см}^3$ скорость C_y достигает 180 м/с . Аналогичные данные по скорости упругих волн получены рядом других исследователей. Так, по данным Ю.В. Луканина [69] для суглинистых почв влажностью $20 \dots 22\%$ и модулем упругости $E = 2,5 \text{ МПа}$ скорость $C_y = 90 \dots 230 \text{ м/с}$. В.И. Виноградов и Г.А. Семенов [24] определили, что для суглинистых почв влажностью 26% скорость $C_y = 23 \dots 39 \text{ м/с}$. Для сухих бесструктурных почв величина скорости C_y доходит до 1500 м/с [38].

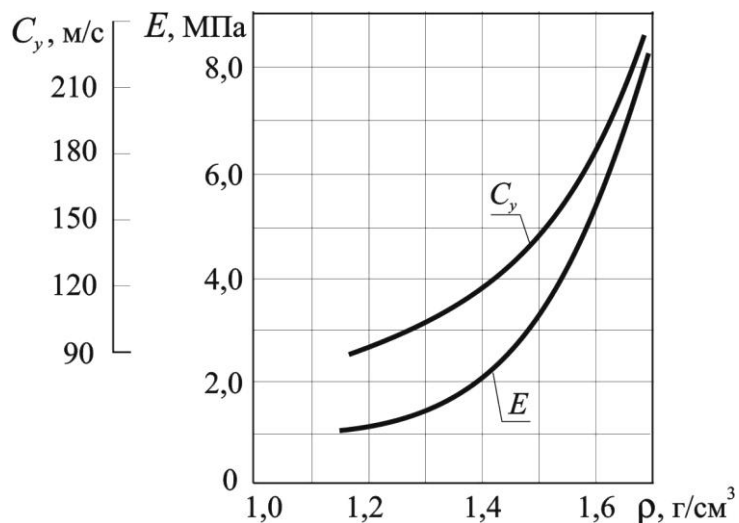


Рис. 6.5. Зависимость скорости упругих волн возмущений и модуля упругости от плотности почвы

Из уравнения (6.23) после некоторых преобразований можно определить предельную скорость удара, которую может выдержать материал до разрушения [34]

$$v_{пред} = \sigma_{II} \sqrt{\frac{1}{E\rho}}, \quad (6.24)$$

где σ_{II} – предел пропорциональности деформации материала.

Так, при $E = 1,4 \dots 1,7$ МПа, $\sigma_{II} = 6,3 \dots 7,3$ кПа, $\rho = 1800$ кг/м³ [103] предельная скорость будет равна $v_{пред} = 0,5 \dots 1,3$ м/с. Этот расчет показывает, что даже при небольших скоростях нагружения неизбежны пластические (остаточные) деформации, приводящие к разрушению почвы.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Таким образом, применение элементарной и волновой теорий удара позволяет определить важные характеристики ударного воздействия рабочих органов на почву: продолжительность соударения, амплитуду и частоту возбужденных колебаний, скорость упругих колебаний.

Продолжительность удара определяется по уравнению

$$\Delta t = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \frac{l}{C_y},$$

где T – период колебаний; l – длина тела, подвергнутого удару или расстояние, проходимое ударной волной от места удара до поверхности поля.

При $l = 0,5$ м; $C_y = 100 \dots 150$ м/с величина $\Delta t = 0,005 \dots 0,007$ с.

Амплитуда колебаний или величина пластической деформации равна

$$a = \frac{2v}{\pi} \Delta t.$$

При $v = 1,5 \dots 2,0$ м/с $a = 1,43 \dots 1,91$ мм. Общее правило состоит в том, что величина амплитуды должна превышать пределы упругой деформации – только в этом случае произойдут необратимые пластические деформации.

Частота колебаний. При ударном воздействии рабочих органов частицы почвы приходят в колебательное движение с амплитудой a и круговой частотой, равной

$$\omega = \frac{\pi}{\Delta t}$$

или числом колебаний

$$n = \frac{1}{2\Delta t}.$$

Для нашего примера величина $n = 1,04 \dots 2,78$ с⁻¹.

6.3.2. Пластические волны напряжений в почве

При динамическом нагружении в почве возникают и распространяются волны напряжений, образуя области возмущений, в которых почва находится в напряженно-деформированном состоянии [51]. Как и любое тело, подвергнутое удару, почва вначале испытывает упругие деформации, которые затем могут переходить в пластические деформации.

Следует отметить, что возникновение пластических деформаций зависит как от величин возникающих напряжений, так и от состояния среды. При малой интенсивности ударного импульса в почве могут образовываться только упругие волны возмущений.

Для определения скорости распространения пластических деформаций рассмотрим элемент dx , выделенный из полубесконечной почвенной среды (рис. 6.6) [51].

В момент времени $t = 0$ сечения этого элемента займут положения 1-1 и 2-2. В момент времени $t+dt$ элементы займут положения 1'-1' и 2'-2'. Перемещение сечения 1-1 обозначим u , а сечения 2-2 через $u+du$. Возмущение, вызванное приложением импульса $P\Delta t$, распространяется в массиве почвы со скоростью C_y и за время t пройдет путь $C_y t$. Передние фронты сечений 1-1 и 2-2 займут положения 1''-1'' и 2''-2''. За время dt все частицы между сечениями 1-1 и 1''-1'', а также 2-2 и 2''-2'' перейдут из состояния покоя в движение со скоростями v и $v+dv$. Из-за малости времени dt можно принять, что все частицы двигаются с одинаковыми скоростями.

Применим к массе почвы, приведенной в движение, теорему об изменении количества движения:

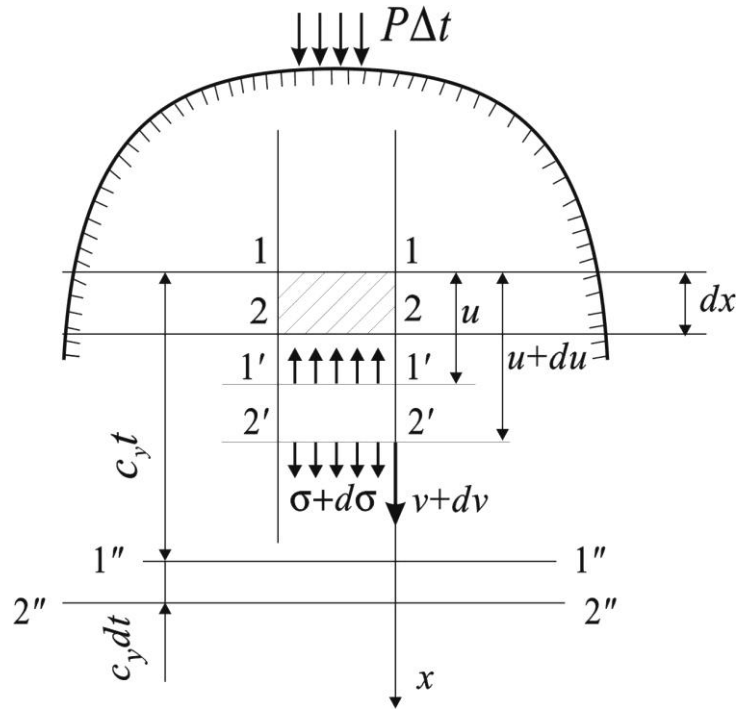


Рис. 6.6. Схема к выводу скорости пластических деформаций

$$\rho F C_y dt (v + dv) - \rho F dt v = (\sigma + d\sigma) F dt - \sigma F dt, \quad (6.25)$$

где ρ - плотность почвы; F - площадь поперечного сечения выделенного элемента почвы.

После преобразований получим

$$\rho C_y dv = d\sigma. \quad (6.26)$$

Примем, что относительная деформация выделенных элементов почвы до фронта и после фронта волны соответственно равна ε и $\varepsilon + d\varepsilon$, тогда перемещение элемента будет равно:

$$u = \varepsilon C_y dt \quad (6.27)$$

и

$$u + du = (\varepsilon + d\varepsilon) C_y dt. \quad (6.28)$$

Из последнего выражения найдем

$$dv = C_y d\varepsilon. \quad (6.29)$$

Решая совместно уравнения (6.26) и (6.29), получим $C_y^2 \rho d\varepsilon = d\sigma$, откуда найдем скорость распространения продольной волны, соответствующей данному напряжению [5]

$$C_y = \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon}}, \quad (6.30)$$

где $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ - тангенс угла наклона касательной к диаграмме σ - ε .

При напряжениях выше предела текучести σ_T формула (6.30) определяет скорость распространения волны пластической деформации $C_{пл}$.

Из изложенного следует, что при динамическом нагружении в почве распространяются напряжения и деформации в форме волнового процесса. Упругие деформации распространяются с большой скоростью, примерно равной скорости звука для данной среды. Пластические деформации распространяются со значительно меньшей скоростью.

А.Н. Гудков расчетным путем определил, что для сухих бесструктурных почв скорость упругих волн может достигать 1400 м/с. В работе С.П. Гупта и А.С. Пандья [39] экспериментально определена скорость распространения упругих волн возмущений для суглинистых почв с верхним пределом пластичности 17% и нижним 12,5%. Опыты

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

проводились в почвенном канале с использованием сейсмологических приборов - геофонов. Геофоны размещались на расстоянии 1,5 м друг от друга. Запаздывание сигнала от предыдущего прибора характеризовало скорость распространения упругой волны. По результатам опытов скорость C_y составила 97,6...250,3 м/с для почвы плотностью 1,71...1,78 г/см³, при скорости нагружения 0,15...2,25 м/с. Авторы рекомендуют при расчетах тягового сопротивления почвообрабатывающих машин учитывать напряжение, создаваемое упругими волнами:

$$\sigma = E \frac{v}{C_y}. \quad (6.31)$$

Ю.А. Ветров и др. [19, 20] рекомендуют определять скорость продольных упругих волн резонансным или импульсным методами. Резонансный метод основан на возбуждении в образце грунта механических колебаний и доведении их до состояния резонанса. Скорость упругой волны в этом случае определяется по уравнению (6.23). Импульсный метод основан на измерении скорости прохождения звукового импульса через образец почвы или грунта. Для этого используются излучатель и приемник звука, установленные на противоположных концах образца. В этом случае скорость продольной упругой волны рассчитывается по формуле $C_y = L/t$, где L – длина образца; t – время прохождения импульса по образцу.

Скорость поперечных (сдвиговых) волн рассчитывается по формуле [61]

$$C_{II} = \sqrt{\frac{G}{\varepsilon_V}}, \quad (6.32)$$

где G – модуль сдвига; ε_V – относительная объемная деформация.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Расчеты и эксперименты показали, что скорость поперечной волны составляет $C_{II}=(0,5\dots 0,6)C_y$ и поэтому не оказывает существенного влияния на напряженно-деформированное состояние почвы.

В.П. Горячкин при выводе предельной скорости удара, приводящей к разрушению материала [34], впервые в земледельческой механике ввел термин **скорость распространения удара**. Это означало, по существу, скорость распространения упругих волн возмущений.

Ю.Ф. Новиков [84] рассматривал распространение ударного возмущения как деформационную волну объемного всестороннего сжатия почвы. Со своей стороны, полагаем, что наиболее правильно все наблюдаемые явления при ударном нагружении почвы рассматривать с позиций распространения и отражения волн деформаций и напряжений. Такое понимание явлений, сопровождающих ударные процессы в почве, разделяют многие ученые [5, 41, 106].

Распространение упругих волн деформаций и напряжений в многофазных дисперсных средах (почвы и грунты) имеет некоторые особенности. При ударе вначале наблюдается резкое локальное увеличение напряжения, а затем его быстрое уменьшение. Это подтверждается графиками рис. 6.7, полученными Л.В. Погорелым [106].

По мнению Л.В. Погорелого, распространение волны давления связано с необратимыми сдвиговыми явлениями уплотнения и перемещения материала. Возникающее в среде под воздействием рабочих органов давление и степень затухания тем больше, чем меньше параметр C_{II} (см уравнение (6.32) и рис. 6.8, а). При постоянном C_{II} (рис. 6.8, б) давление существенно возрастает с увеличением скорости деформатора и распространяется на расстояние от 0 до 0,10 м. По времени давление изменяется незначительно (рис. 6.8, в).

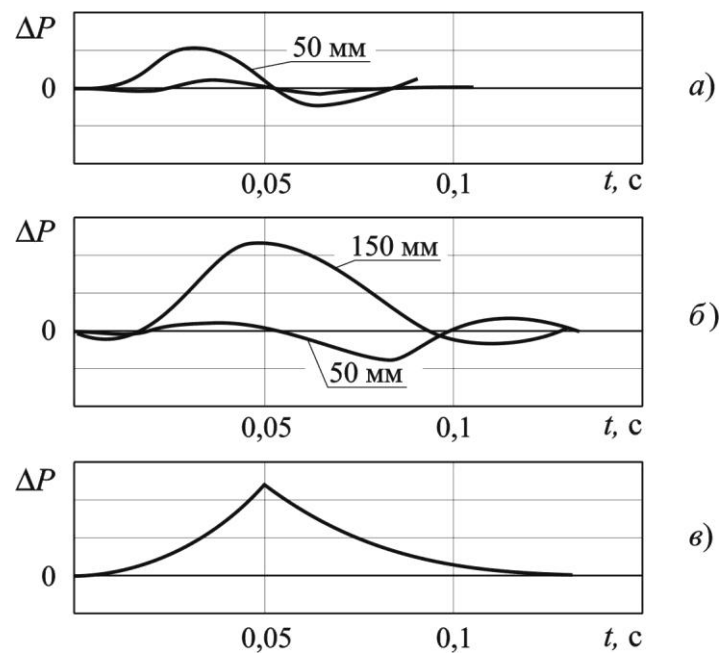


Рис. 6.7. Характер распространения и затухания давления ΔP волны сжатия в горизонтальном слое почвы: *a* – единичная импульсная нагрузка на глубине 50 мм; *б* – то же на глубине 150 мм; *в* – типовая аппроксимация нарастания и затухания ударного импульса

В результате анализа экспериментальных данных Л.В. Погорелый делает важный вывод: интервал времени и величина напряжений от воздействия рабочих органов ограничены свойствами почвы, особенно если предел ее прочности характеризуется малой крутизной верхней ветви нелинейной механической характеристики (см. рис. 3.2). Он установил, что для среднегумусного чернозема в горизонте 50...150 мм при абсолютной влажности 16% скорость распространения пластических деформаций достигает 5,8...14,3 м/с, а при влажности 22...24% снижается до 3,8...5,6 м/с. Поэтому увеличение рабочих скоростей деформаторов

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

целесообразно только до определенных пределов. Допустимое значение скорости деформации почвы будет определяться условиями разрушения ее структурных элементов. Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что критическая скорость нагружения не должна превосходить 1,3 м/с.

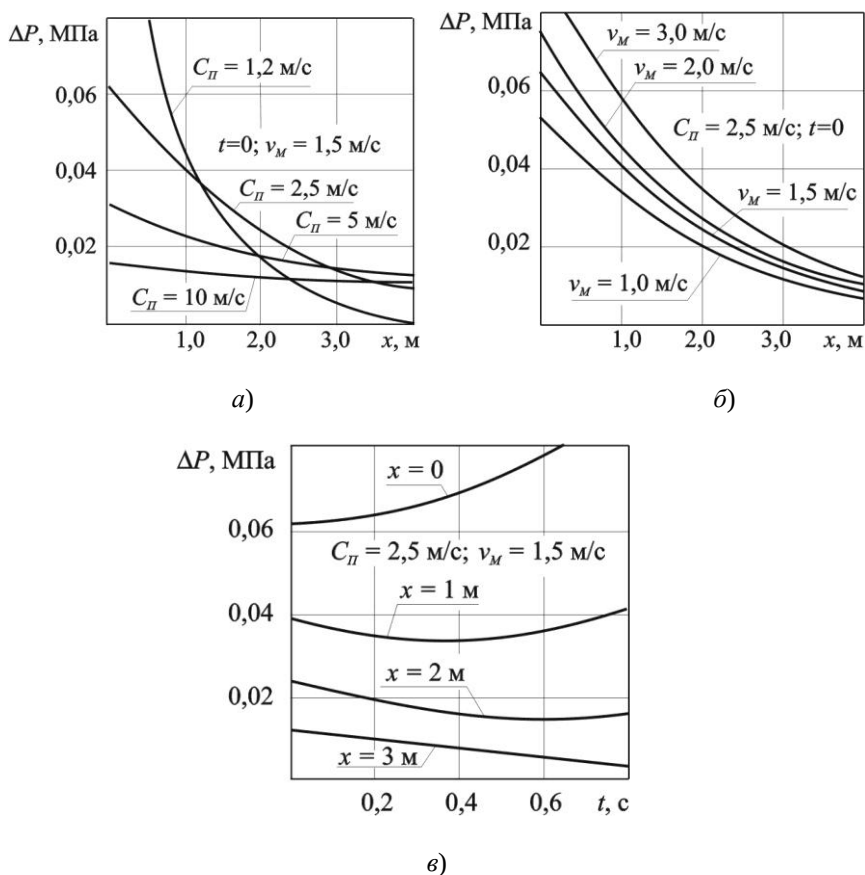


Рис. 6.8. Зависимости изменения давления ΔP плоской волны сжатия деформируемой среды по продольной координате:
 а - при различных механических свойствах;
 б - скорости рабочего органа; в - в различные моменты времени

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

При определении скорости пластических деформаций по уравнению (6.30) необходимо располагать динамическими диаграммами напряжение – деформация $\sigma(\varepsilon)$. Количество таких диаграмм для почв в литературе весьма ограничено [24, 145]. Динамические диаграммы получены В.И. Виноградовым и Г.А. Семеновым [24] для суглинистой почвы естественного сложения при влажности 26% и твердости 2,5...3,0 МПа. Авторами принято, что в интервале малых значений деформаций ε и при $d\sigma / d\varepsilon = \text{const}$ распространяются волны упругих деформаций со скоростью C_y , а при больших деформациях – пластических деформаций со скоростью $C_{пл}$. Ввиду того, что диапазон изменения скоростей нагружения в этой работе был невысок, В.А. Юзбашев провел расчет скорости $C_{пл}$ для скоростей нагружения до 12 м/с. Расчеты [103] проведены с использованием экстраполяции исходных данных по эмпирической зависимости $\sigma_B = \sigma_{B0} + k_0 \ln \frac{v}{v_0}$. График зависимости

$\sigma(\varepsilon)$ при различных скоростях нагружения приведен на рис. 6.9, а, расчетные зависимости скорости $C_{пл}$ – на рис. 6.9, б.

Как следует из графика на рис. 6.9, б, расчетная скорость распространения пластических деформаций $C_{пл}$ находится в диапазоне 5...10 м/с при скорости нагружения от 0,4 до 4,41 м/с. Примерно такой же диапазон скоростей $C_{пл}$ был получен рядом других исследователей расчетным и экспериментальным путем. Так, В.В. Кацыгин [55] исследовал движение клина в почве методом гидродинамической аналогии на основе уравнения Бернулли для потока сжимаемой среды и получил, что скорость распространения волн напряжений разрушения (пластических деформаций) для суглинистой почвы различной твердости

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

составляет 9,8...15,0 м/с. Г.А. Деграф [41] в лабораторных условиях определил скорость распространения напряжений разрушения. По его данным, при твердости почвы 0,9 МПа, влажности 14,7% и глубине хода двугранного клина 0,23 м скорость $C_{пл}$ составила 7,5 м/с. Для трехгранного клина при твердости почвы 1,35 МПа и влажности 22,9% скорость $C_{пл}$ равнялась 6,0...6,6 м/с.

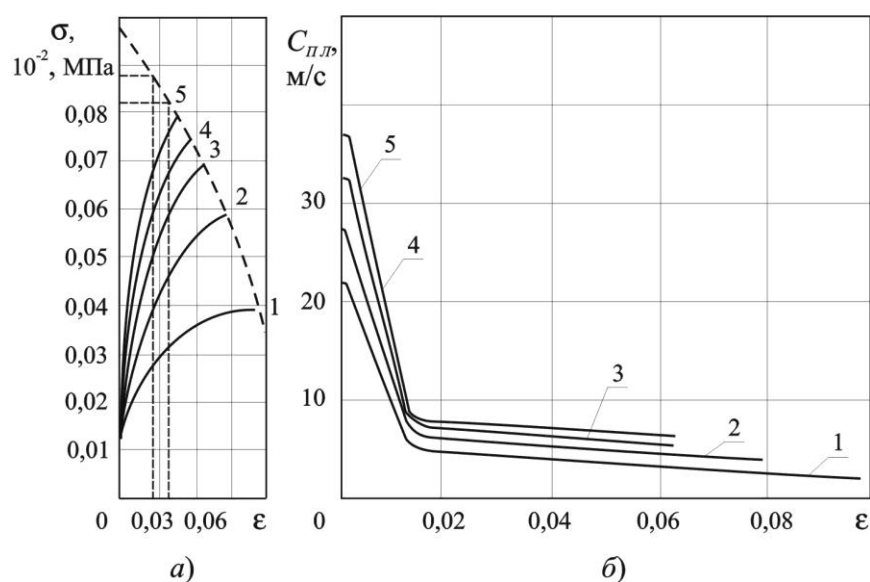


Рис. 6.9. Зависимости напряжений σ (а) и скорости пластических деформаций $C_{пл}$ (б) от скорости нагружения:
1 – 0,4 м/с; 2 – 1,96 м/с; 3 – 2,8 м/с; 4 – 3,94 м/с; 5 – 4,41 м/с

И.З. Багиров [8] определил диапазон зоны распространения напряжений и пластических деформаций, используя метод закладки в почву тензометрических месдоз перед движущимся клином (рис. 6.10). Скорость движения установки изменялась от 0,5 до 5,03 м/с.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Осциллограммы показали, что при резании супесчаного грунта происходит плавное нарастание напряжений сжатия до максимального значения, а затем при достижении предела прочности происходит резкое снижение величин напряжений. Характер изменения напряжений подобен кривым на рис. 6.9.

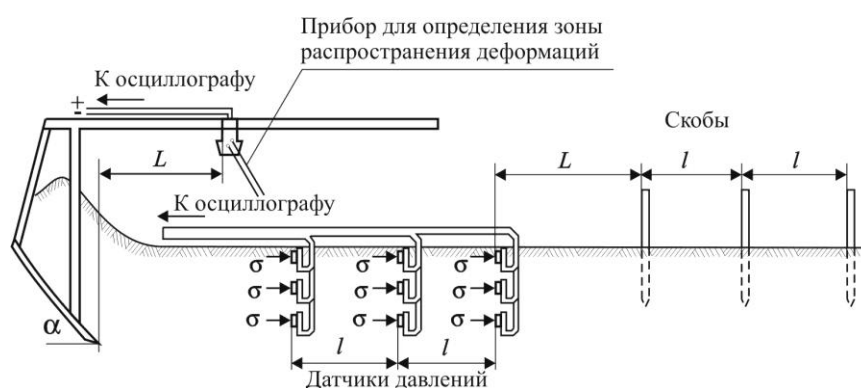


Рис. 6.10. Схема определения зоны распространения напряжений и деформаций перед клином

Приведенные данные свидетельствуют о том, что скорость распространения пластических деформаций выше рабочих скоростей традиционных почвообрабатывающих машин (отвальных плугов, культиваторов и др.), но скорости воздействия машин с активными рабочими органами (фрез, ротационных плугов), которые достигают 8...15 м/с [123], могут превосходить скорости пластических деформаций.

Таким образом, установленные закономерности распространения упругих и пластических деформаций объясняют причины повышения энергоемкости обработки почвы при повышенных скоростях почвообрабатывающих машин. Оказывается, что при деформации почвы

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

выше предела упругости, величины пластических деформаций зависят от скорости нагружения. Чем больше скорость нагружения, тем меньше время протекания пластической деформации и тем **выше напряжение, при котором происходит переход от упругой к пластической деформации** [51]. Сказанное можно видеть на динамических диаграммах рис. 6.11.

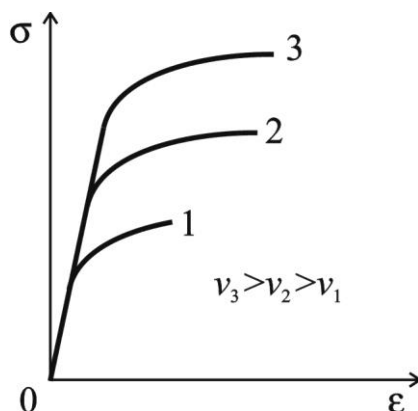


Рис. 6.11. Динамические диаграммы $\sigma(\epsilon)$ при различных скоростях нагружения: 1 – 2 м/с; 2 – 3 м/с; 3 – 4,5 м/с

Из графиков рис. 6.11 видно, что с увеличением скорости нагружения увеличивается сопротивление пластической деформации σ_T и увеличивается временное сопротивление σ_B . Кроме того, прямолинейные участки механических характеристик, на которых зависимость $\sigma(\epsilon)$ подчиняется закону Гука, практически совпадают, а нелинейные участки располагаются тем выше, чем выше скорость нагружения. Это значит, что при динамическом нагружении существенно возрастает модуль упругости материала, а пределы текучести и прочности увеличиваются, смещаясь в

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

область меньших деформаций. Чем выше скорость деформации, тем в большей мере пластическая деформация отстает от скорости приложения импульсной нагрузки, тем меньше остаточные деформации и больше напряжение, при котором происходит переход от упругой деформации к пластической [51]. Эта закономерность была отмечена также М.Д. Подскребко.

После обработки экспериментальных данных В.И. Виноградов [23] вывел эмпирическую зависимость для определения предела прочности почвы в зависимости от скорости нагружения

$$\sigma_B = \sigma_{B0} + k' \ln \frac{v}{v_0}, \quad (6.33)$$

где σ_{B0} – предел прочности почвы при скорости приложения нагрузки $v_0 = 1,0$ м/с; k' – коэффициент пропорциональности, учитывающий динамические свойства почвы.

По данным В.И. Виноградова для выщелоченного чернозема, на стерне овса средней твердости 2,6 МПа в горизонте 0-30 см, при влажности 27,8% коэффициент k' равен 0,16 кПа.

Аналогичное уравнение для зависимости временного сопротивления от скорости при растяжении образца ненарушенной полевой почвы использовал М.Д. Подскребко.

Наглядное представление о различном характере поведения материала при статическом и динамическом нагружении дает диаграмма на рис. 6.12 [51].

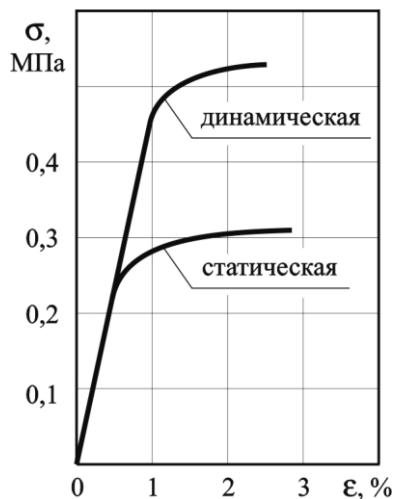


Рис. 6.12. Статическая и динамическая диаграммы сжатия мягкой стали

Другую трактовку критической скорости резания почвогрунтов предложил Ю.А. Ветров со ссылкой на В.П. Станевского [125]. Если предположить, что почвогрунты разрушаются в результате деформации сдвига, то почвогрунт можно рассматривать как вязкую среду, к которой применима формула Прандтля для скорости напряжений сдвига при движении вязкой жидкости в пограничном слое. Поэтому скорость разрушения почвогрунта предложено определять по уравнению

$$v_P = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (6.34)$$

где τ_0 – сопротивление сдвигу.

С достаточной степенью вероятности можно принять, что скорость разрушения по уравнению (6.34) адекватна скорости распространения пластических деформаций $C_{\text{пл}}$. Используя данные

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

В.В. Кацыгина, построим зависимости $\tau_0(\rho)$ и $C_{пл} = f(\rho, \tau_0)$ (рис. 6.13). Из графиков следует, что скорость $C_{пл}$, рассчитанная по уравнению (6.34) находится в пределах 7...10 м/с, т.е. совпадает с данными, полученными в экспериментах.

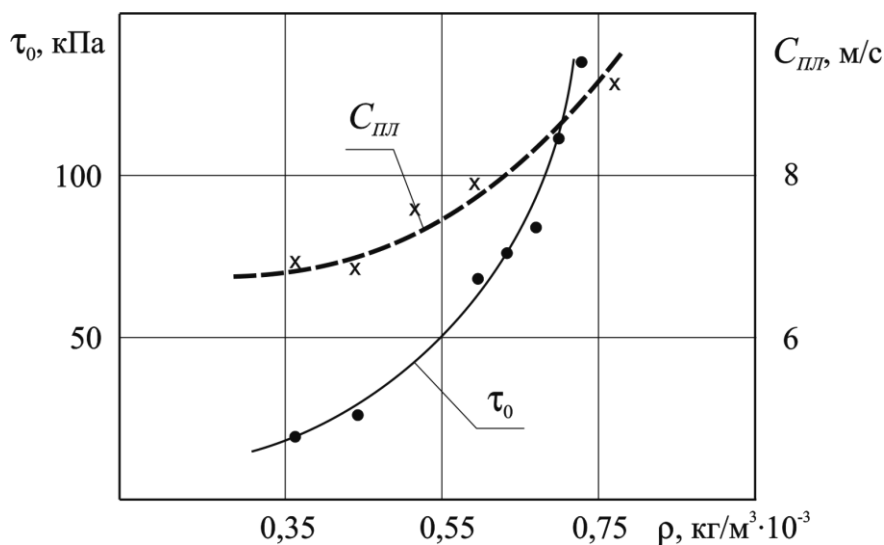


Рис. 6.13. Зависимость $C_{пл}$ от плотности почвы ρ и напряжения сдвига τ_0

На основании полученных данных Ю.А. Ветров пришел к выводу, что сопротивление почвогрунта с возрастанием скорости резания увеличивается не только в результате затрат энергии на сообщение движения отделяющимся кускам грунта, но и от физических факторов. Основным из этих факторов является скорость разрушения v_p , которая, в свою очередь, связана с изменением характера разрушения, т.к. при этом преобладающим становится хрупкое разрушение, сопровождающееся

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

интенсивным измельчением почвогрунта, отделяемого от массива или пласта.

К физическим факторам повышения сопротивления резанию почвогрунтов при увеличении скорости относится также то, что пластические деформации сопровождаются необратимыми изменениями структуры почвы и взаимным перемещением частиц. При статическом нагружении процесс перестройки внутреннего строения почвы успевает следовать за деформацией. При динамическом нагружении процесс перестройки отстает от деформации и идет в этом случае за счет упругой деформации твердых частиц и почвенных агрегатов. Поэтому величина необратимых (пластических) деформаций меньше. Для получения одной и той же остаточной деформации до появления первичной трещины при динамическом нагружении требуется большее напряжение. При нагружении тела выше предела упругости величина пластической деформации определяется скоростью нагружения: чем больше скорость, тем меньше время протекания пластической деформации и тем больше напряжение, при котором происходит переход от упругой деформации к пластической. Эта закономерность выражается согласно [72]

$$\sigma = \sigma_c(\varepsilon) + a \ln(1 + b \dot{\varepsilon}_p), \quad (6.35)$$

где $\sigma_c(\varepsilon)$ – статическая зависимость «напряжение-деформация»; a и b – физические параметры; $\dot{\varepsilon}_p$ – скорость пластической деформации, которая равна

$$\dot{\varepsilon}_p = \exp\left(\frac{\sigma - \sigma_c}{a} - 1\right). \quad (6.36)$$

Из последнего выражения следует, что скорость пластической деформации является функцией разности между статическим и

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

динамическим напряжениями, достигнутыми при одной и той же деформации.

В работах [70, 48] установлено, что разрушение материалов при динамическом нагружении наступает при напряжениях $\sigma_{Вд}$, превышающих статические напряжения $\sigma_{Вс}$ в 1,3...2 раза.

Рассмотренные вопросы динамических процессов воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин на почву позволяют сделать следующие обобщения:

1. Взаимодействие традиционных пассивных и приводных (активных) рабочих органов почвообрабатывающих машин с почвой носит динамический характер и сопровождается возникновением упругих и пластических волн напряжений и деформаций. Причем скорость распространения упругих волн значительно превосходит скорость резания даже активных рабочих органов. Скорость пластических волн разрушения соизмерима со скоростями взаимодействия рабочих органов с почвой, прежде всего, приводных рабочих органов (почвообрабатывающих фрез, ротационных плугов).

2. Использование положений классической теории удара упругих и не вполне упругих тел позволило определить такие важные характеристики динамического процесса, как продолжительность и скорость удара, а также величину необратимых (пластических) деформаций, необходимых для разрушения почвы.

3. Для каждого типа почв существует предельная скорость распространения пластических деформаций, при достижении которой рабочий орган начинает взаимодействовать с почвой в режиме удара, разрушение при этом приобретает локальный и хрупкий характер с соответствующим повышением энергозатрат.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

4. Повышение энергоемкости обработки почвы с ростом рабочих скоростей объясняется не только тем, что отделяемые элементы стружки отбрасываются на более далекое расстояние, но и рядом физических факторов. Например, при деформации почвы выше предела упругости величина предельной пластической деформации (деформации разрушения) определяется скоростью нагружения. Чем больше скоростью нагружения, тем меньше время протекания пластической деформации и тем больше напряжение, при котором происходит переход от упругой к пластической деформации.

5. Повышение скорости взаимодействия рабочих органов с почвой увеличивает ее прочностные характеристики (временное сопротивление) в 1,3...2 раза.

6.4. Реологические свойства почвы

Как было установлено выше, естественно-сложенные почвы представляют собой дисперсные системы с коагуляционной структурой. Твердые частицы этой структуры, соединенные коллоидами, образуют беспорядочную сетку, а поры между структурными элементами и частицами заполнены газовой и водной средой. Согласно [27] в реологии такие системы рассматриваются как нелинейная упруго-вязкая среда. Нелинейность проявляется в изменении напряжения с увеличением деформации, упругость – в наличии у почвы восстанавливающихся деформаций, пластичность – в наличии необратимых деформаций, вязкость – в способности к релаксации. Приложение внешней нагрузки к массиву почвы вызывает смещение и перекомпоновку структурных элементов и твердых частиц скелета, а также вытеснение водно-воздушных фаз из порового пространства. Перестройка сложения почвы, коллоидных структур, фильтрация свободной воды и газовой смеси

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

протекают не мгновенно, а в течение некоторого времени. Из этого следует, что поведение реальной почвы зависит не только от абсолютной величины приложенной нагрузки, но и от времени воздействия деформатора, т.е. от скорости рабочих органов [65, 68]. Поэтому к почве применимы закономерности реологии, изучающей протекание деформаций материалов во времени [27]. Значительный вклад в развитие понимания почвы как реологического образования применительно к теории и практике земледельческой механики принадлежит А.С. Кушнареву [67].

Вышеперечисленные свойства (упругость, пластичность и вязкость) могут проявляться в реальных почвах в различных сочетаниях, поэтому их описание представляет сложную и практически невыполнимую задачу. Для анализа реологических свойств и характеристик почвы применяют так называемые реологические модели, в которых основные свойства представляют в виде простых механических элементов (рис. 6.14).

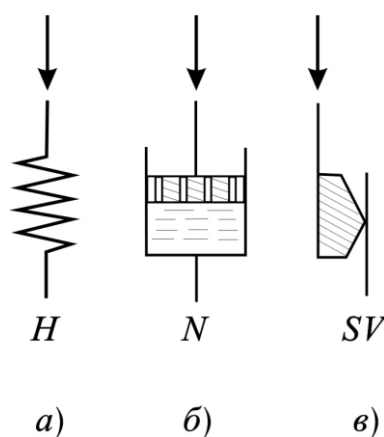


Рис. 6.14. Механические модели: *a* – упругого тела Гука; *б* – вязкого тела Ньютона; *в* – пластичного тела Сен-Венана

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Упругие свойства почвы моделируются пружиной (рис. 6.14, а), которая отображает закон Гука $\sigma = \varepsilon E$ и обозначается символом H . Идеально вязкая жидкость моделируется цилиндром с жидкостью, в которой погружен дырчатый поршень. Этот элемент обозначается символом N (рис. 6.14, б). Скорость перемещения поршня описывается законом Ньютона $\sigma = \eta \frac{d\varepsilon_B}{dt}$, где ε_B – относительная вязкая деформация;

η – коэффициент вязкости. Пластические деформации моделируются телом Сен-Венана и обозначаются символами SV (рис. 6.14, в). Соединением трех перечисленных элементов в различных сочетаниях можно описать различные проявления упруго-вязко-пластичных характеристик почвы (рис. 6.15).

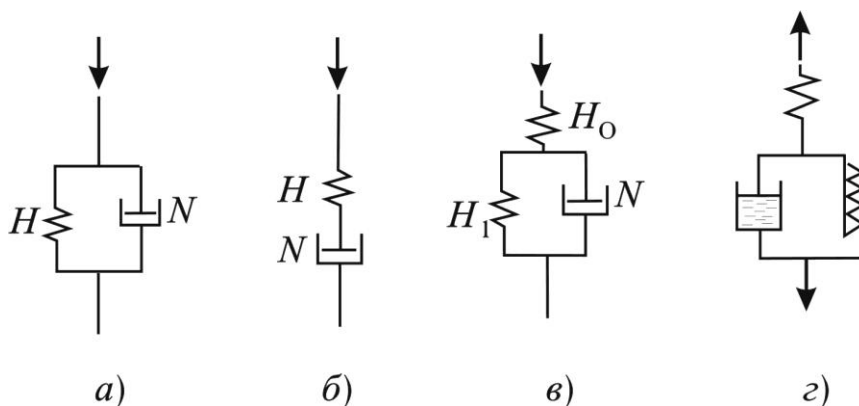


Рис. 6.15. Механические модели упруго-вязко-пластичных тел:
 а – Фойгта; б – Максвелла;
 в – обобщенного упруго-вязкого тела Кельвина; з - Бингама

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Ряд закономерностей поведения реальных почв при динамическом нагружении рассмотрим на модели упруго-вязкой жидкости Максвелла (рис. 6.16).

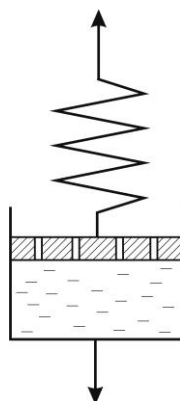


Рис. 6.16. Модель упруго-вязкого тела Максвелла

Жидкость в цилиндре моделирует водную фазу почвы, отверстия в поршне – это поры, пружина – скелет почвы и почвенные агрегаты.

Предположим, что нагрузка передается вначале на пружину и по мере ее деформации часть нагрузки компенсируется погружением поршня [27]. Деформация такой модели равна сумме упругого ε_y и вязкого ε_B элементов

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_B, \quad (6.37)$$

где $\varepsilon_y = \varepsilon / E$.

Для вязкого течения в соответствии с законом Ньютона имеем

$$\tau = \eta \dot{\gamma}, \quad (6.38)$$

где η - коэффициент вязкости при сдвиге; $\dot{\gamma}$ - скорость смещения (деформации) при сдвиге.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

В соответствии с (6.38) для вязкого течения со скоростью $\dot{\varepsilon}_B$ подставляя σ вместо τ и $\dot{\varepsilon}_B$ вместо $\dot{\gamma}$, имеем

$$\dot{\varepsilon}_B = \frac{\sigma}{\eta_\varepsilon}, \quad (6.39)$$

где η_ε - коэффициент вязкости при продольной деформации.

Скорость деформации найдем, дифференцируя (6.37) по времени, и, учитывая (6.39), получим

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_V + \dot{\varepsilon}_B = \frac{1}{E} \dot{\sigma} + \frac{1}{\eta_\varepsilon} \sigma. \quad (6.40)$$

Перепишем последнее уравнение в следующем виде

$$\dot{\sigma} + \frac{E}{\eta_\varepsilon} \sigma = E \dot{\varepsilon}. \quad (6.41)$$

Решением этого линейного дифференциального уравнения при постоянной деформации $\varepsilon = \text{const}$ и при начальных условиях $t = 0$; $\sigma = \sigma_0$ получим

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E}{\eta_\varepsilon} t\right), \quad (6.42)$$

где σ_0 – начальное напряжение при мгновенном нагружении.

В случае чистого сдвига удлинение ε будет соответствовать деформации сдвига γ , а нормальное напряжение σ - касательному напряжению τ и уравнение (6.42) запишется

$$\tau = \tau_0 \exp\left(-\frac{G}{\eta} t\right), \quad (6.43)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

где G – модуль упругости при сдвиге; η – коэффициент динамической вязкости при сдвиге; τ_0 – начальное напряжение при мгновенном нагружении.

Уравнение (6.43) показывает, как изменяется напряжение во времени. Если $\dot{\gamma} = 0$ и деформация поддерживается постоянной, то из последнего выражения, обозначая величину называемую временем релаксации $\frac{\eta}{G} = T_p$, получим уравнение

$$\tau = \tau_0 \exp\left(-\frac{t}{T_p}\right). \quad (6.44)$$

Уравнение (6.44) выражает релаксацию (ослабление) напряжений в модели Максвелла. График изменения напряжения во времени показан на рис. 6.17.

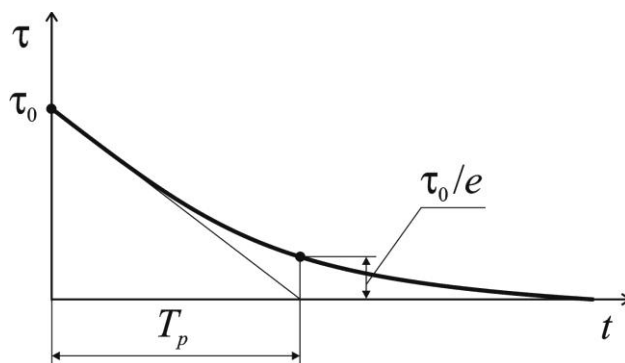


Рис. 6.17. График релаксации напряжений во времени

Из графика наглядно следует, что если после приложения нагрузки оставить деформацию постоянной, например, зафиксировать концы пружины, то произойдет релаксация – ослабление напряжений.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Время релаксации является одним из фундаментальных реологических параметров. Если в уравнении (6.44) принять $t = T_p$, то это уравнение примет вид $\tau = \tau_0 / e$, из которого следует, что за время релаксации напряжение уменьшится в $e \approx 2,718$ раз по сравнению с первоначальным значением.

Из уравнения Максвелла (6.44) также следует, что для упруго-вязких тел проявление их упругих и вязких свойств зависит от соотношения времени деформации t и времени релаксации T_p . Если t значительно меньше T_p ($t \ll T_p$), то тело ведет себя как тело Гука: $\tau = \gamma G$. Если $t \gg T_p$, то тело проявляет свойства ньютоновской жидкости: $\tau = \eta \dot{\gamma}$.

Для воды $T_p = 10^{-1}$ с, поэтому при мгновенной нагрузке, например, со скоростью летящей пули, вода ведет себя как хрупкое тело. По данным М.Д. Подскребко, почвенные образцы при скоростях деформации от 0,02 до $0,40 \text{ с}^{-1}$ имеют значительное время релаксации – 0,17...0,18 с. Поэтому почвы могут проявлять упругие, пластичные и вязкие свойства в зависимости от скорости деформации.

В работе [118] установлено, что абсолютное снижение давления ΔP штампа на грунт за время 0,6 с может быть вычислено по эмпирической зависимости $\Delta P = A P_0$, где P_0 – начальное значение давления. Для песка плотностью $1,75 \text{ г/см}^3$ при влажности 5% коэффициент $A = 0,12$. Если начальное давление на штамп было 50 Па, то за счет релаксации за время 0,6 с оно снижается на 5...12%.

Если скорость сдвиговой деформации постоянна и равна $\dot{\gamma}$, то из выражения (6.44) получим

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + (\tau_0 - \eta \dot{\gamma}) e^{-\frac{t}{T_p}}. \quad (6.45)$$

Это уравнение выражает семейство кривых изменения напряжений от времени (рис. 6.18).

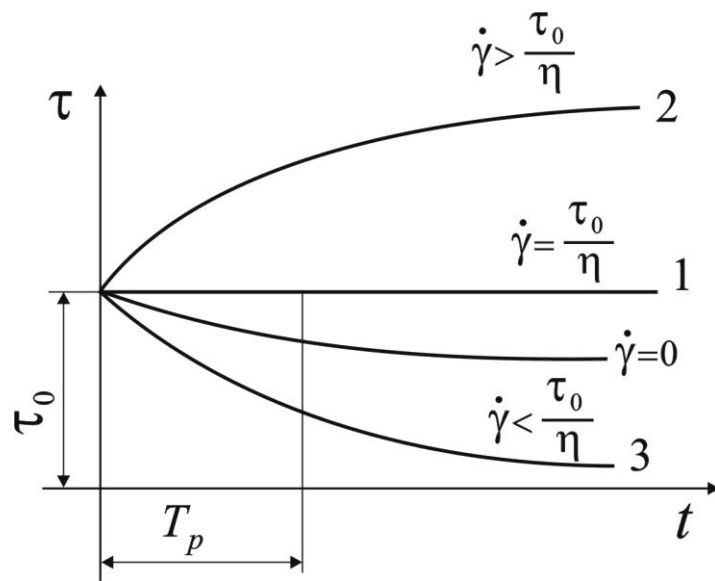


Рис. 6.18. Зависимость напряжения от времени при разных скоростях деформации

Из графика следует, что при скорости деформации $\dot{\gamma} = \frac{\tau_0}{\eta}$ напряжения постоянны, т.е. $\tau = \tau_0$, и наблюдается установившееся течение деформации (прямая 1 на рис. 6.18). При скорости деформации $\dot{\gamma} > \frac{\tau_0}{\eta}$

напряжения растут (кривая 2), при скорости деформации $\dot{\gamma} < \frac{\tau_0}{\eta}$

напряжения уменьшаются (кривая 3).

С уменьшением времени релаксации слабее проявляются твердообразные (хрупкие) свойства упруго-вязких тел. Из уравнения (6.45) также следует важный практический вывод: для любого тела существует предельная или критическая скорость деформации $\dot{\gamma}_{пр}$ (см. раздел 6.3), при которой внешние силы уравниваются внутренним сопротивлением. При превышении скорости нагружения величины $\dot{\gamma}_{пр}$ внутренние силы больше внешних и тогда разрушение примет вид хрупкого без предшествующей пластической деформации (см. рис. 6.9). Это обусловлено существенным изменением механических свойств разрушаемого материала. Как уже отмечалось, при динамических нагрузках повышается величина модуля упругости, а также пределы текучести и временного сопротивления.

Г.И. Покровский [105] предложил характеризовать повышение прочности грунта переменной величиной модуля деформации, который при динамическом нагружении продолжительностью t определяется по выражению

$$E_o = E_0 + \frac{k_1}{t}, \quad (6.46)$$

где E_0 – модуль деформации при статическом действии силы; k_1 – константа, зависящая от свойств грунта.

По рекомендации Ю.А. Ветрова и др. [20] динамический модуль деформации определяется по формуле:

$$E_o = C_y^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu}, \quad (6.47)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

где C_y – скорость продольной упругой волны по выражению (6.23); μ – динамический модуль Пуассона, определяемый по формуле

$$\mu = \frac{0,5 - A^2}{1 - A^2}, \quad (6.48)$$

где A – отношение скоростей поперечной и продольной волн.

Для металлов влияние скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ на предел текучести σ_{T0} предложено характеризовать зависимостью [51]

$$\sigma_{T0} = \sigma_{T0} \left[1 + k \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^n \right], \quad (6.49)$$

где σ_{T0} – предел текучести при статическом нагружении; k и n – постоянные материала.

Аналогичная зависимость (6.33) получена для характеристики предела прочности при разрыве естественно-сложенной почвы [23].

В.В. Царицын [132] считает, что общепринятая модель упруго-вязкого тела Кельвина, используемая в работах [30,52] не объясняет явление релаксации не вполне упругого тела. Он предложил модернизированную модель тела Кельвина в виде четырехзвенника $ABCD$ (рис. 6.19), где все звенья соединены шарнирами. Вектор напряжения σ может изменять место приложения на звене AB . При переходе вектора напряжения σ от точки A к точке B можно исследовать процесс обжатия модели твердого тела с переменными упругостью и вязкостью. Если вектор σ будет приложен к точке A , то в процессе деформации получим только упругость. Если вектор σ будет приложен к точке B , то будет наблюдаться только вязкость.

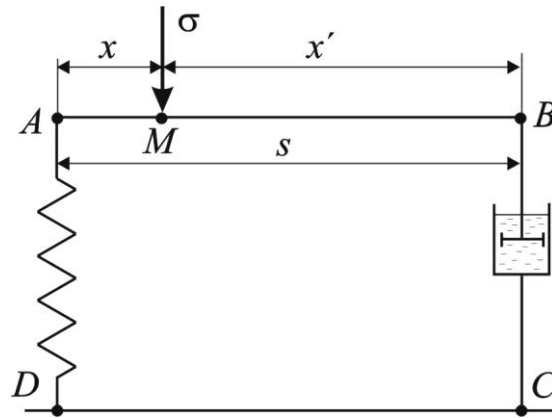


Рис. 6.19. Модель упруго-вязкого тела

При расположении вектора напряжения σ в точке M участие вязкости и упругости в деформации будет зависеть от соотношения плеч AM и MB . Если обозначить σ_1 – напряжение от упругости и σ_2 – напряжение от вязкости, то общее напряжение равно $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$. Пользуясь обозначениями на рис. 6.19 получим

$$\sigma_2 = \sigma \frac{x}{s}; \quad \sigma_1 = \sigma \frac{s-x}{s}. \quad (6.50)$$

Т.к. $\sigma_2 = \mu \frac{d\varepsilon_2}{dt}$, где μ – коэффициент вязкости, то имеем

$$\sigma = \sigma \frac{s-x}{s} + \mu \frac{d\varepsilon_2}{dt}. \quad (6.51)$$

Обозначим $\theta = \frac{s-x}{s}$, тогда

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$\sigma(1-\theta) = \mu \frac{d\varepsilon_2}{dt}. \quad (6.52)$$

Величина деформации ε тела складывается из упругой ε_1 и вязкой (или остаточной) ε_2 составляющих $\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$, следовательно

$\varepsilon_2 = 2\varepsilon - \varepsilon_1 = 2\varepsilon - \frac{1}{E} \sigma_1$, где E – модуль упругости или постоянная пружины (рис. 6.19).

Т.к. $\sigma_1 = \sigma\theta$, то $\frac{d\varepsilon_2}{dt} = 2 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\theta}{E} \frac{d\sigma}{dt}$. С учетом уравнения (6.52) получим

$$\frac{\sigma(1-\theta)}{\mu} = 2 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\theta}{E} \frac{d\sigma}{dt}. \quad (6.53)$$

Уравнение (6.53) является основным уравнением не вполне упругого тела, где коэффициент θ изменяется от нуля до единицы и характеризует структурное состояние тела в процессе его деформации. Это уравнение, считает В.В. Царицын, позволяет объяснить явления релаксации, а также упругого последствия, наблюдаемого в реальных телах.

Так, при $\varepsilon = \text{const}$ решение уравнения (6.53) дает

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{Et}{\mu} \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right)} = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau} \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right)}. \quad (6.54)$$

Из уравнения (6.54) следует, что при $\theta = 1$ (условии чистой упругости) $\sigma = \sigma_0$, следовательно, тело не проявляет релаксации. При $\theta = 0$ (условии только вязкой деформации) $\sigma \rightarrow 0$ и тело полностью разгружается (расслабляется).

Явление релаксации в предлагаемой модели упруго-вязкого тела проявляется следующим образом: после приложения нагрузки к звену AB в точке M и $\varepsilon = \text{const}$ сила реакции пружины уравнивается перемещением поршня в вязкой жидкости, поэтому звено AB некоторое время t поворачивается вокруг точки M .

Если принять $\sigma = \text{const}$, то согласно уравнению (6.53) имеем

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = \frac{dt}{2\mu}(1 - \theta). \quad (6.55)$$

Из этого уравнения следует, что приращение деформации не вполне упругого тела зависит от двух переменных: времени t и структурного коэффициента θ . При чистой упругости $\theta = 1$ приращение деформации в напряженном теле невозможно. Приращение деформации возможно только в случае, когда $\theta < 1$ и тело обладает вязкостью.

Для вывода зависимости между напряжением и деформацией для модели упруго-вязкого тела В.В. Царицын использовал следующие положения:

1. При абсолютной упругости тела период релаксации равен нулю ($T_p = 0$).
2. При участии одной вязкости тело разгружается или течет. Принято, что время течения равно времени релаксации ($T_p = t$). Следовательно, коэффициент вязкости μ является величиной переменной и изменяется в зависимости от степени напряженности, т.к. $T_p = \frac{\mu}{E}$.

Используя эти положения в качестве первого приближения можно принять

$$T_p = (1 - \theta)t. \quad (6.56)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Для функции $\sigma = f(\varepsilon)$ при постоянной скорости деформации с учетом $\mu = E\tau$, получим

$$\frac{\sigma}{Et} = 2 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\theta}{E} \frac{d\sigma}{dt}.$$

При $\frac{d\varepsilon}{dt} = v = \text{const}$ имеем

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\theta} = 2v \frac{E}{\theta}.$$

Решение этого уравнения дает

$$\sigma = \frac{2E\varepsilon}{1 + \theta}. \quad (6.57)$$

При условии абсолютной упругости тела $\theta = 1$ получим известную формулу пропорциональности между напряжением и деформацией

$$\sigma = E\varepsilon.$$

При $\theta \neq 0$ имеем $\sigma = 2E\varepsilon$.

Такое представление о деформации сжатия не вполне упругих тел позволяет установить причину появления остаточных деформаций после обжатия образца в пределах упругости. Таким образом, не вполне упругое тело, прежде чем разрушиться, проходит стадии упругости, упруго-вязкости или упруго-пластичности и, наконец, пластического течения.

Сравнивая уравнение (6.57) с уравнением, принятым в теории упругости $\sigma = E_0\varepsilon$, получим:

$$E_0 = \frac{2E}{1 + \theta}. \quad (6.58)$$

Из этого следует, что на самом деле модуль упругости является переменной величиной и зависит не только от упругих характеристик материала твердого тела, но и от его упруго-вязких характеристик.

При ударном характере приложения внешнего усилия, приведенные зависимости несколько изменятся, т.к. период релаксации $T_p > t$ (t очень мало) и $\theta = 1 - \frac{T_p}{t}$ приобретает обратный знак.

В.В. Царицын установил, что при ударном характере нагрузки энергия, необходимая для разрушения материала, меньше, чем при статической нагрузке, если принять, что энергия разрушения пропорциональна разрушаемому объему.

Для описания процессов деформирования упруго-вязких тел Л. Больцман обобщил уравнение (6.45) и установил, что механическое поведение твердого тела определяется не только значением воздействия в данный момент времени t , но и всей предшествующей историей его деформирования [27]. Эта закономерность, называемая **теорией наследственной ползучести Больцмана-Волтера** [63], основывается на двух гипотезах:

1. Упругие силы зависят не только от мгновенно полученных смещений, но и от предшествующих деформаций, которые оказывают тем меньшее влияние, чем больше времени прошло с момента их образования.

2. При наличии в прошлом многократных деформаций, их влияние на текущую деформацию может быть установлено простым суммированием.

Если к некоторому времени τ произошла деформация $\varepsilon(\tau)$, длившаяся $\Delta\tau$ и затем задержанная, как это имеет место при релаксации, то напряжение в момент времени $t > \tau$, по закону Больцмана будет равно

$$\sigma(t, \varepsilon) = E\varepsilon(t) - f(t - \tau)\varepsilon(\tau)\Delta\tau, \quad (6.59)$$

где $f(t - \tau)$ - монотонно убывающая функция, характеризующая уменьшение со временем влияния прошлой деформации.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Влияние нескольких прошлых деформаций учитывается использованием принципа суперпозиции

$$\sigma(t, \varepsilon) = E\varepsilon(t) - \sum_i (t - \tau_i) \varepsilon(\tau_i) \Delta\tau_i. \quad (6.60)$$

При непрерывном процессе деформирования следует перейти от суммы к интегралу

$$\sigma(t, \varepsilon) = E\varepsilon(t) - \int_{-\infty}^t f(t - \tau) \varepsilon(\tau) d\tau. \quad (6.61)$$

Функцию $f(t - \tau)$ называют ядром интегрального уравнения, и ее вид устанавливают на основе экспериментальных зависимостей ползучести или релаксации напряжений [67].

Рассмотренные физические основы деформаций и разрушения почвы позволили установить следующее:

1. При взаимодействии клинообразных рабочих органов с почвой начальным видом деформации является сжатие, после чего развиваются другие виды деформации: сдвиг, растяжение, изгиб и т.д.

Действие клина на пласт вызывает образование серии сдвигов от сжатия в нижней части пласта, не достигающих поверхности поля, затем образуется криволинейная трещина отрыва или сдвига достигающая поверхности поля. Одновременно, пласт делится на слои параллельно и перпендикулярно поверхности поля.

2. Наиболее приемлемой расчетной моделью прочности почвы является теория прочности Кулона-Мора, из которой следует возможность снижения энергоемкости разрушения почвы путем комбинации разнонаправленных деформаций сжатия и растяжения.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

3. При динамическом нагружении в почве возникают упругие и пластические волны напряжений и деформаций, которые при движении создают напряжения, превосходящие пределы прочности почвы, в том числе благодаря чередованию деформаций сжатия и растяжения.

4. С увеличением скорости нагружения увеличиваются значения предела текучести и временного сопротивления почвы. Поэтому существует предельная скорость нагружения для каждого типа почв, при превышении которой резко возрастают энергозатраты

5. Увеличение энергоемкости обработки почвы на повышенных рабочих скоростях объясняется не только дальностью отбрасывания элементов стружки, но и рядом физических факторов, в том числе, повышением прочностных характеристик почвы, а также возможным превышением скорости нагружения над скоростью распространения пластических деформаций.

6. Проявление пластических, вязких или хрупких свойств почвы во многом зависит от соотношения времени релаксации (ослабления напряжений) и времени нагружения. Среднесуглинистые почвы имеют значительное время релаксации, поэтому они в зависимости от скорости деформирования могут проявлять упругие, пластические, вязкие и хрупкие свойства.

7. Для снижения энергоемкости обработки почвы нужны поиски новых, нетрадиционных физических процессов для деформации и разрушения межагрегатных связей в почве.

Глава 7. Процесс крошения почвы

Как известно, механическая обработка почвы проводится с целью создания наиболее благоприятных водного, воздушного, теплового, пищевого и биологического режимов, способствующих получению высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Почвенные условия жизни растений зависят от многих факторов, важнейшим из них является гранулометрический состав почвы [111], т.к. степенью дисперсионности определяется ее удельная поверхность, с которой связан весь комплекс физико-химических и биологических процессов. По мнению В.П. Горячкина, урожайность сельскохозяйственных культур зависит не только от химического и механического состава почвы, но и от размера почвенных частиц. Важно также, чтобы вся дисперсионно-коллоидная часть почвы находилась в виде водоустойчивых микро- и макроагрегатов, образующих структуру почвы. Современная агрономическая наука не столь категорична в выводах о величине порога вредности пылеватых частиц [112]. Другим важным выводом агрономических исследований является установление дифференциации пахотных слоев: высокая активность верхнего и малая активность нижнего, а также сравнительно высокое плодородие после перемешивания верхнего и нижнего слоев [111], что может достигаться фрезерной или ротационной обработкой почвы рабочими органами с принудительным приводом.

7.1. Определение фракционного состава почвы

В.П. Горячкин обратил внимание на предложение К. Терцаги определять распределение частиц почвы в функции их массы от общей массы почвенной пробы. Согласно действующим стандартам, степень

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

крошения почвы определяется отношением массы фракций почвенных частиц размером 50 мм ($\sum Q_{50}$) к общей массе почвенной пробы, т.е.

$$k_{\text{кр}} = \frac{\sum_{50}}{Q_{\text{п}}} \cdot 100\% \quad (7.1)$$

П.У. Бахтин [13] указывает, что высшему качеству обработки почвы соответствует 90...100% содержание комков размером менее 50 мм и менее 5% пыли; хорошему качеству – 70...90% комков и 5...10% пыли; низкому – 30...50% комков и 15...20% пыли. За пыль принято считать фракции размером менее 0,25 мм.

Для определения степени крошения и распыления почвы берутся почвенные пробы размером 30×30×20 см до и после прохода почвообрабатывающей машины. Разделение на фракции производится с помощью набора решет (крупные фракции) и сит (мелкие фракции) с круглыми отверстиями. Разделение на фракции производится вручную путем встряхивания решет или сит. Для облегчения разделения почвенной пробы на фракции были предложены устройства со щелевыми решетками [126] и цилиндрическими решетками [141], с приводом от электромотора.

Для объективной энергетической оценки однотипных почвообрабатывающих машин предложено определять удельные затраты мощности отнесенные к суммарной поверхности (м^2) почвенных фракций [83] или к средневзвешенному диаметру почвенного комка, полученных в результате фракционного анализа почвы [93].

В основу этих методов положена гипотеза П.Риттингера [83], согласно которой работа, затраченная на дробление твердого тела, пропорциональна вновь полученной (обнаженной) поверхности частиц. Если рассматривать общую массу почвенной пробы как объем статистической выборки, то отношение массы комков определенного

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

размера к общей массе пробы будет представлять частоту, соответствующую данному интервалу фракций

$$p_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100\%, \quad (7.2)$$

где m_i – масса комков в i -м интервале; m – общая масса почвенной пробы.

За величину среднего диаметра комков в каждой фракции принимают среднее значение отверстий верхнего и нижнего решет (сит) или диаметр наибольшего и наименьшего комков в данной фракции

$$d_i = \frac{d_{iB} + d_{iH}}{2}, \quad (7.3)$$

где d_{iB} и d_{iH} – размер отверстий верхнего и нижнего решет (сит).

Для упрощения расчетов принимаем, что комки всех фракций имеют форму куба. Тогда поверхность одного комка равна $S_i = 6d_i^2$, где d_i – размер грани куба или среднее значение размера комка во фракции. Тогда поверхность комков всех фракций, отнесенная к объему почвенной пробы, будет равна

$$s_{CP} = 6 \sum_{i=1}^n p_i d_i, \quad (7.4)$$

где n – число фракций; P_i – доля соответствующей фракции (в %).

Суммарная поверхность почвенных комков, образующихся в единицу времени при проходе почвообрабатывающей машины, будет равна

$$S = abvs_{CP} = abv \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{d_i}, \quad (7.5)$$

где a , b , v – соответственно глубина, ширина (м) и скорость (м/с) работы.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

В результате ситового анализа может быть определен средневзвешенный размер почвенного комка, полученный за один проход машины [126]

$$d_{CP} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i d_i}{100}. \quad (7.6)$$

Средневзвешенный размер комка можно также определить через массы комков в каждой фракции

$$d_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i Q_i}{100 Q_{\Pi}}, \quad (7.7)$$

где Q_i – масса комков в i -й фракции; Q_{Π} – общая масса пробы.

В естественно сложенном состоянии пласт почвы пронизан корнями растений, пустотами, микро- и макротрещинами и другими локальными дефектами (дислокациями). Поэтому даже без взаимодействия с рабочими органами почвообрабатывающих машин, пласт распадается на крупные комки и глыбы. При оценке степени крошения необходимо учитывать первоначальный размер почвенных комков (D_{CP}), поступающих на рабочие органы.

Для анализа крошения почвы различными почвообрабатывающими машинами по данным ситового (фракционного) анализа строят гистограммы распределения размеров почвенных комков или графики статистической плотности и функции распределения случайной величины диаметра комков.

На рис. 7.1 представлены гистограмма и интегральная кривая распределения размеров почвенных комков для фрезерного и пахотного режимов работы ротационного плуга РП-200, а также после лемешного плуга ПН-3-35 [100].

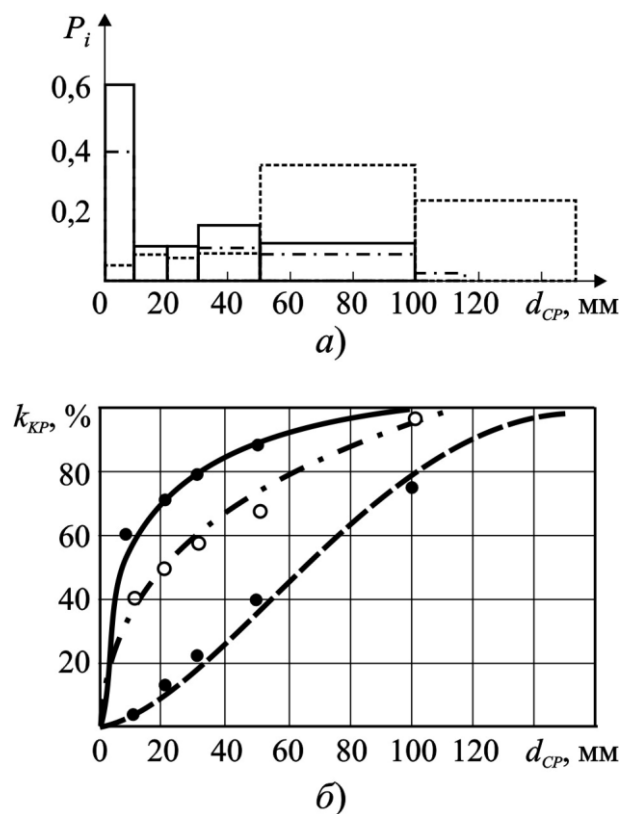


Рис. 7.1. Гистограмма (а) и функция распределения (б) степени крошения почвы после обработки ротационным и лемешным плугами:

- РП-200 (подача 0,125 м; $a=0,2$ м; $v=1,33$ м/с);
- · - · - РП-200 (подача 0,125 м; $a=0,2$ м; $v=1,33$ м/с);
- - - - ПН-3-35 ($a=0,2$ м; $v=1,33$ м/с);

Из графиков рис. 7.1 следует, что степень крошения почвы ротационным плугом на пахотных режимах с подачами 0,125 м и, особенно 0,258 м, приближается к степени крошения лемешного плуга (70%).

7.2. Элементы теории дробления (крошения) почвы ротационными рабочими органами с принудительным приводом

За последние годы значительное распространение получают почвообрабатывающие машины с принудительным приводом рабочих органов (фрезы, ротационные и комбинированные плуги) [100]. Применение таких орудий обусловлено возможностью их работы в условиях повышенной связности и влажности почвы, там, где пассивные рабочие органы не обеспечивают требования к качеству крошения.

Разрушение крупных глыб и комков на более мелкие фракции происходит в таких машинах по преимуществу ударом. Как подчеркивают авторы труда «Роторные дробилки» [11], процесс дробления можно рассматривать как с позиций классической механики, так и с волновой. Классическая механика предполагает приложение сил удара к центру инерции тел, а сами тела при упругом ударе – абсолютно твердыми. Здесь же предлагается следующая трактовка физической сущности процесса дробления (разрушения) при ударе. Внешние силы вызывают накопление внутренней энергии упругих деформаций. Напряжения в ударяемом теле возрастают, пока, вследствие концентрации напряжений в каком-либо местном дефекте, не будет превзойден предел прочности. Тогда начнется развитие трещины, сопровождающееся перераспределением энергии упругих деформаций, часть которой превратится в энергию вновь образованных поверхностей. Эта часть энергии является полезной энергией дробления. Остальная энергия уходит на упругие деформации сжатия и рассеивается в виде тепла и других видов энергии.

Особенностью физики процесса является волновой характер процесса деформации и крошения. Как известно **волны** давления и

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

деформации в среде распространяются периодически образующимся **фронтом в форме сферы** с центром в месте приложения ударной нагрузки. В таком процессе имеет место *радиально расходящееся движение частиц*, аналогичное показанному на рис. 8.5, с преобразованием **локального сжатия в растяжение и сдвиговые деформации всего объема почвенного элемента**. Именно возможность локального приложения нагрузки для крошения всего объема пласта объясняет достигаемую повышенную степень крошения, в большем, чем для пассивных рабочих органов, диапазоне твердости, связности и влажности почвы. Кроме того, используются особенности реологии почв, а именно зависимость предела прочности почвы от скорости приложения нагрузки.

Рассмотрим крошение почвы ротором, установленным с правой стороны плужного корпуса так называемого комбинированного плуга [96]. При подрезании пласта лемехом и дальнейшем движении его по укороченному отвалу, происходит разделение пласта на отдельные относительно крупные комки. На ротор поступает пласт, монолитность которого уже нарушена. Окончательное крошение комков производит ротор. Воздействие ротора на комки носит ударный характер, т.к. количество движения ударяющихся тел изменяется на конечную величину за короткий промежуток времени. Импульс ударной силы имеет значительную величину, поэтому всеми другими силами, например силами трения, можно пренебречь.

При неупругом ударе двух тел кинетическая энергия вращающегося ротора расходуется на деформацию комков. Для ударного взаимодействия ротора с комком почвы это положение выразится следующим образом

$$\Delta T = \frac{1}{2} J (\omega_1^2 - \omega_2^2) + m(v_{n1}^2 - v_{n2}^2), \quad (7.8)$$

где J – момент инерции ротора относительно оси его вращения; ω_1 и ω_2 – угловые скорости ротора до и после удара; m – масса комка почвы; v_{n1} и v_{n2} – проекции скорости комка на нормаль удара до и после удара.

Рассматривая почву как упруго-пластичное тело, введем коэффициент восстановления при ударе

$$k_B = \frac{v_{n2} - \omega_2 R_i}{\omega_1 R_i - v_{n1}}, \quad (7.9)$$

где R_i – радиус ротора в данном сечении.

Используя уравнение моментов количества движения относительно оси вращения ротора, имеем

$$mR_i(v_{n2} - v_{n1}) = J(\omega_2 - \omega_1). \quad (7.10)$$

После преобразования и совместного решения с (7.8) получим

$$\Delta T = \frac{1}{2} \frac{Jm(1 - k_B^2)(v_{n1} - \omega_1 R_i)^2}{J + mR_i^2}. \quad (7.11)$$

Разность скоростей v_{n1} - v_{n2} представляет собой скорость соударения комка почвы с рабочим элементом ротора. Примем, что удар происходит в горизонтальной плоскости, в которой располагаются составляющие относительной скорости комка V_x и V_y , а окружная скорость в данном сечении $v_o = \omega_1 R_i$.

В работе [94] минимальная скорость соударения зубьев ротора с комком определена следующим образом. Потеря кинетической энергии ротора в результате удара с комком почвы выражается уравнением (7.11). Энергию, затраченную на деформацию почвы, можно определить,

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

руководствуясь следующими соображениями [59]. Как и прежде, будем полагать, что удар зуба о комок почвы происходит в горизонтальной плоскости. Скорость комка на нормаль удара равна v_n . Полагаем, что распределение напряжений в комке почвы описывается линейной функцией

$$\sigma_x = \sigma x/l, \quad (7.12)$$

где σ - максимальное напряжение на конце комка, по которому ударяет зуб; x - расстояние от свободного конца комка; l - длина комка почвы.

Работа деформации элемента комка dx равна

$$dA = \frac{\sigma^2}{2l^2} F \frac{x^2 dx}{E}. \quad (7.13)$$

Полная работа деформации

$$A = \frac{\sigma^2 Fl}{6E}. \quad (7.14)$$

Приравняв уравнения (7.11) и (7.14), найдем

$$\sigma = \sqrt{\frac{3EJ(1-k_B^2)(v_n - \omega R_i)^2}{(J + mR_i^2)Fl}}.$$

Т.к. $Fl\rho = m$, то

$$\sigma = \sqrt{\frac{3EJ(1-k_B^2)(v_n - \omega R_i)^2 \rho}{J + mR_i^2}}. \quad (7.15)$$

Обозначив $v_{KP} = v_n - \omega R_i$ и подставив в формулу (7.15) предельное значение напряжения σ_B для почвы, найдем критическое значение скорости удара, при которой произойдет разрушение комков почвы:

$$v_{KP} = \sqrt{\frac{J + mR_i^2}{3EJ(1 - k_B^2)\rho}}. \quad (7.16)$$

Момент инерции J ротора может быть определен одним из известных методов. В табл. 7.1 приведены значения v_{KP} , рассчитанные для комбинированного плужного корпуса с ротором, имеющим $J = 0,017 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и почвы с $\rho=1600 \text{ кг/м}^3$; $E=2,0 \text{ МПа}$ в зависимости от массы комков и при двух значениях $\sigma_B = 0,3$ и $0,5 \text{ МПа}$; $k_B=0$.

Учитывая, что окружные скорости зубьев ротора не превышают $5\ldots 8 \text{ м/с}$, из данных таблицы следует, что при заданных параметрах ротора, будут разрушаться, в основном, комки, имеющие предельные значения σ_B до $0,3 \text{ МПа}$ и массой до $2,0 \text{ кг}$. Для крошения более прочных и крупных комков необходимо увеличить окружную скорость ротора.

Предельную скорость удара зубьев ротора можно также определить с позиций теории дробления материалов [4].

Таблица 7.1

Расчетные значения критической скорости v_{KP} , м/с

Масса комков, m , кг	При сопротивлении почвы, σ_B , МПа	
	0,3	0,5
0,01	4,02	6,72
0,5	4,48	7,49
1,0	4,98	8,32
2,0	5,87	9,81

При взаимодействии ударных элементов ротора со сходящими с отвала комками пласта разрушение происходит по линиям наименьших связей с образованием новых частиц. Введем понятие дробления почвы

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$\xi = d_H / d_K$, равного отношению первоначального диаметра почвенного комка d_H к средневзвешенному диаметру комка d_K , полученному после всех процедур крошения.

Работа по разрушению твердых тел определяется согласно обобщенному закону П.А. Ребиндера [114]

$$A = k_S \Delta s + k_V V, \quad (7.17)$$

где k_S – удельная поверхностная энергия; Δs – площадь поверхностей, вновь образованных после разрушения; k_V – коэффициент пропорциональности, зависящий от прочностных свойств разрушаемых тел, по величине равный удельной объемной работе деформации; V – объем разрушаемого тела.

Полагаем, что при начальном разрушении пласта на лемехе и отвале работа деформации пропорциональна объему деформируемой почвы и эквивалентна первому члену уравнения (7.17), а работа крошения комков почвы ротором с образованием новых комков эквивалентна второму члену выражения (7.17).

Согласно закону Кирпичева-Кика [4] частицы разрушаемого материала распадаются на геометрически себе подобные. Если для получения заданной степени крошения однократного воздействия ротора недостаточно, то дробление следует повторить несколько раз. Так как работа деформации пропорциональна объему материала, который остается неизменным, то затраты на дробление будут одинаковы, если степень дробления ξ постоянна на всех стадиях крошения.

Примем, что комки, на которые распадается пласт, имеют шарообразную форму и обозначим число повторностей дробления через n , тогда можно записать

$$\frac{d_H^3}{d_K^3} = Z_K^N \text{ или } n = \frac{\lg(d_H^3/d_K^3)}{Z_K}, \quad (7.18)$$

где Z_K – число частиц, на которые дробится комок при однократном ударе.

Дробление пласта почвы до заданных размеров фракций можно представить следующим образом [114]

$$A = k_1 n = k_1 \frac{\lg d_H^3 / d_K^3}{\lg Z_K}, \quad (7.19)$$

где k_1 – удельный расход энергии при однократном дроблении единицы объема материала.

Преобразовав уравнение (7.17), получим

$$A = k' \lg \frac{d_H^3}{d_K^3}, \quad (7.20)$$

где k' – коэффициент, численно равный работе на преодоление упругой и пластической деформации комков.

С другой стороны, работа k' равна

$$k' = \frac{\pi d_H^3 \sigma^2}{12E}, \quad (7.21)$$

где σ – предел прочности при сжатии.

Тогда уравнение (7.20) можно записать

$$A = \frac{\pi d_H^3 \sigma^2}{4E} \lg \xi. \quad (7.22)$$

Кинетическую энергию, потерянную ротором при ударе о пласт почвы, запишем в следующем виде

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

$$A_{y\partial} = \frac{m_p m}{2(m_p + m)} (1 - k_B^2) v_{y\partial}^2, \quad (7.23)$$

где $m_p = J / R_i^2$ - приведенная к точке удара масса ротора; m - масса комка почвы.

В силу равенства $A = A_{y\partial}$, запишем

$$\frac{m_p m}{2(m_p + m)} (1 - k_B^2) v_{y\partial}^2 = \frac{\pi d_H^3 \sigma^2}{4E} \lg \xi. \quad (7.24)$$

После преобразований уравнения (7.24) окончательно получим

$$v_{y\partial} = \sigma \sqrt{\frac{\pi d_H^3 \rho + 6 g m_p}{2 E m_p \rho (1 - k_B^2)}} \lg \xi. \quad (7.25)$$

Для почв с механической характеристикой $\sigma = 0,3$ МПа; $E = 5$ МПа; $\rho = 1600$ кг/м³; $k_B = 0$ минимальная скорость удара $v_{y\partial}$, рассчитанная по уравнению (7.25) составляет 4,5 м/с. Полученная величина скорости $v_{y\partial}$ примерно равна значению скорости $v_{кр}$, рассчитанной по уравнению (7.16). Это свидетельствует о правомочности принятых допущений.

Из уравнения (7.25) определим степень дробления комков почвы в зависимости от параметров ротора и комков почвы

$$\xi = 10^{c v_{y\partial}^2}, \quad (7.26)$$

где

$$c = \frac{2 E m_p \rho (1 - k_B^2)}{3 \sigma^2 d_H^3 \rho + 6 g m_p}. \quad (7.27)$$

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Из уравнения (7.27) следует, что степень дробления (крошения) почвы зависит от параметров ротора, механических свойств почвы, массы и величины комков, поступающих на ротор, и скорости взаимодействия ротора с пластом почвы.

На графиках (рис. 7.2) представлены зависимости степени дробления ξ от предела прочности комков σ , скорости соударения $v_{y\partial}$, коэффициента восстановления k_B , приведенной массы m_P ротора и первоначального размера почвенного комка d_H .

Из графиков следует, что наибольшее влияние на степень дробления имеют прочность комков σ и скорость удара $v_{y\partial}$. Однако при значениях прочности $\sigma > 0,3$ МПа степень дробления практически остается постоянной. Поэтому можно сделать вывод, что определяющим фактором для дробления (крошения) почвы является частота вращения ротора n .

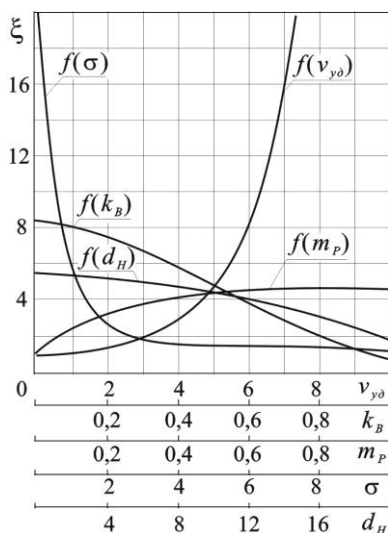


Рис. 7.2. Зависимости степени дробления ξ почвы от величин $v_{y\partial}$, k_B , m_P , σ , d_H

7.3. Аналитические методы определения степени крошения почвы. Гипотеза В.В. Кацыгина

В литературе отсутствуют признанные, физически адекватные, научно-обоснованные теории, позволяющие аналитически определять степень крошения почвы при различных видах ее обработки: пахоте, культивации, бороновании и др. в зависимости от параметров почвы и рабочих органов. Имеются лишь несколько попыток косвенного определения крошения почвы. Так, В.В. Кацыгин [54] теоретически определил влияние скорости почвообрабатывающих машин на интенсивность крошения почвы, используя гипотезу Г.И. Покровского, считавшего, что разрушение материала происходит при определенном количестве энергии, поглощенном единицей объема вещества. В.В. Кацыгин утверждает, что крошение пласта, зависит не столько от величины напряжения, сколько от разницы в напряженном состоянии соседних элементов почвы, т.е. от градиента напряжений и от характера напряженного состояния всего почвенного пласта.

Как было установлено выше, при движении рабочего органа в почве, впереди него образуется напряженная зона. Градиент напряжений в этой зоне зависит от интенсивности поглощения почвой потока энергии, передаваемого в волновом процессе. Очевидно, что разделение пласта на отдельные фракции будет тем выше, чем больше энергии поглощается в зоне сдвига (скалывания). Следовательно, чем меньше объем деформируемого пласта, тем большего эффекта по крошению почвы можно ожидать.

Если обозначить удельную поглощенную энергию ψ_z , которая пропорциональна общему потоку энергии u , проходящему через зону площадью S , тогда

$$\psi_{\varepsilon} = \frac{du}{dx} = -\beta_{\varepsilon} u, \quad (7.28)$$

где β_{ε} – коэффициент поглощения энергии в данной среде.

После разделения переменных, уравнение (7.28) запишется в виде

$$\frac{du}{u} = -\beta_{\varepsilon} dx. \quad (7.29)$$

В зоне скола (сдвига) при $x = 0$, в случае неупругого взаимодействия рабочего органа с почвой, поток энергии максимален и равен

$$u_0 = \frac{mv^2}{2}, \quad (7.30)$$

где m – масса деформируемой зоны пласта; v – скорость движения рабочего органа.

После решения дифференциального уравнения (7.29) и преобразований, найдем величину удельной поглощенной энергии

$$\psi_{\varepsilon} = -\beta_{\varepsilon} \frac{mv^2}{2S} e^{-\beta_{\varepsilon} x}. \quad (7.31)$$

Эта энергия распределяется перед рабочим органом по экспоненте, что наглядно видно на графике рис. 4.14. Координату x в уравнении (7.31) можно заменить расстоянием $l_{СК}$ от носка рабочего органа до зоны скалывания, на которое распространяется пластическая деформация. Расстояние $l_{СК}$ определяется глубиной обработки, углом скалывания и параметрами рабочего органа: $l_{СК} = f(a, \psi, \alpha)$. Реальные почвы пронизаны большим количеством различных дислокаций (дефектов): трещин, пустот, инородных включений и т.п. По мере возрастания

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

напряженного состояния почвы под действием приложенной нагрузки вокруг некоторых дефектов, например, трещин как концентраторов напряжений, возникают отдельные разрушения. Это происходит, прежде всего, в местах, где напряжения оказываются больше прочности межагрегатных связей. В эти моменты происходят лавинообразные разрушения монолита пласта, и он крошится на отдельные агрегаты и комки.

Характер распределения прочностных (межагрегатных) связей в монолите пласта В.В. Кацыгин предлагает принять соответствующим кривой распределения случайных величин Максвелла

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_0^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (7.32)$$

где x – параметр процесса; σ_0 – среднеквадратическое отклонение параметра x .

Для принятого распределения среднее значение параметра x равно $\bar{x} \approx 1,25\sigma_0$. Под средним значением параметра $\bar{x}$ понимается средняя критическая величина энергии $\psi_{0Э}$, поглощенной элементарным объемом почвы.

В соответствии с законом Максвелла, плотность распределения критического значения поглощенной энергии можно выразить уравнением

$$P_\psi = 1,56 \frac{\psi_{0Э}}{\psi_{0Э}^2} e^{-0,78 \left(\frac{\psi_{0Э}}{\psi_{0Э}^2} \right)^2}. \quad (7.33)$$

На основании изложенного, В.В. Кацыгин формулирует следующую гипотезу: «Степень крошения k_p равна отношению вероятного количества точек контакта, в которых критическое значение величины

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

удельной поглощенной энергии ниже текущего, к количеству всех точек контакта», т.е.

$$k_p = \int_0^{\psi} P_{\psi} d\psi_{\Sigma} = 1,59 \frac{1}{\psi_{0\Sigma}^2} \int_0^{\psi} \psi_{\Sigma} e^{-\frac{0,78}{\psi_{0\Sigma}^2} d\psi_{\Sigma}} . \quad (7.34)$$

После интегрирования и подстановки ψ_{Σ} из уравнения (7.31), получим

$$k_p = 1 - \frac{1}{e^{\frac{v^4 \ln \frac{1}{1-k_{p1}}}{1-k_{p1}}}} , \quad (7.35)$$

где k_{p1} – степень крошения почвы при скорости $v=1$ м/с.

Если же при скорости обработки v степени крошения почвы k_{p1} будут 0,5 или 0,25, тогда, соответственно, расчетные формулы примут вид

$$k_p = 1 - \frac{1}{e^{0,7v^4}} \text{ и } k_p = 1 - \frac{1}{e^{0,3v^4}} . \quad (7.36)$$

Графики изменения степени крошения почвы от скорости, рассчитанные по уравнениям (7.36), приведены на рис. 7.3.

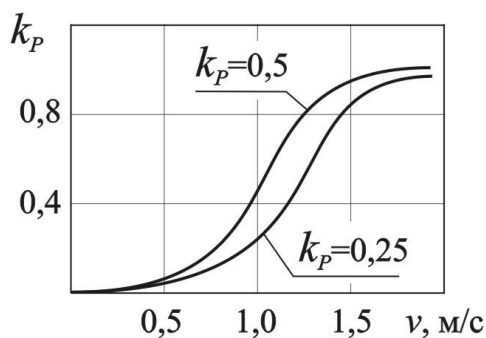


Рис. 7.3. Зависимости степени крошения почвы k_p от скорости v

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Из графиков видно, что интенсивность крошения почвы с увеличением скорости сначала резко возрастает, а затем этот рост практически прекращается. Это объясняется масштабным фактором, т.е. зависимостью прочности от размеров разрушаемого тела. Процесс грубого крошения, как уже сказано выше, можно представить, в основном, как развитие имеющихся дефектов в структуре монолита. При переходе к крошению более мелких фракций, дефекты в них становятся все более редкими, а сами комки все более прочными [114]. Затраты энергии на обработку почвы начинают интенсивно возрастать с приближением рабочих скоростей к скорости распространения пластических деформаций, а степень крошения повышается незначительно. Поэтому для каждого типа почвообрабатывающих машин существуют физические пределы рабочих скоростей, выше которых увеличение нецелесообразно.

7.4. Концепция слабого звена

В основу этой концепции положена статистическая теория прочности, учитывающая неоднородность свойств реальных материалов. Согласно этой теории, разрушение зависит от местных напряжений в точках, где встречаются наиболее опасные дефекты структуры [15], и что дефекты подчиняются некоторому статистическому распределению. Чем крупнее тело, тем большая вероятность обнаружить элемент низкой прочности. Кривая распределения прочности приведена на рис. 7.4. По оси абсцисс отложена величина предела прочности (критического напряжения σ), которую имел бы образец, если бы источником разрушения был данный дефект, а по оси ординат – соответствующая ему плотность вероятности $p(\sigma)$. Так как критические напряжения распределены по объему образца неравномерно, то источником разрушения будет дефект с

минимальным значением критических напряжений. Поэтому эта модель получила название слабого звена, т.к. такая модель отождествляется с разрушением цепи, которая разрушается в наименее прочном звене.

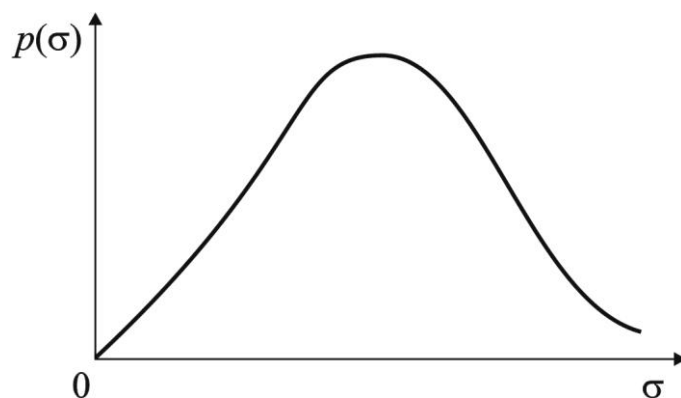


Рис. 7.4. Кривая распределения критических напряжений
(по В.Т. Трощенко)

Если рассматривать грунты как полидисперсные среды, а почвенные агрегаты как зерна пространственной решетки, можно ориентировочно рассчитать степень крошения по числу пластически деформированных зерен [129]. Примем закон распределения напряжений по зернам (почвенным агрегатам) в виде нормального распределения (Гаусса)

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp\left[-\frac{\sigma - \sigma_{CP}^2}{2\Delta^2}\right], \quad (7.37)$$

где σ_{CP} и Δ - среднее значение и дисперсия напряжения.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Построим графики изменения числа пластически деформированных почвенных агрегатов в зависимости от σ_{CP}/σ_T (рис. 7.5) по формуле

$$v_{III} = c_1 + c_2 \left(\frac{\sigma_{CP}}{\sigma_T} \right)^\omega, \quad (7.38)$$

где ω , c_1 и c_2 – постоянные, зависящие от дисперсии кривой распределения напряжений по почвенным агрегатам.

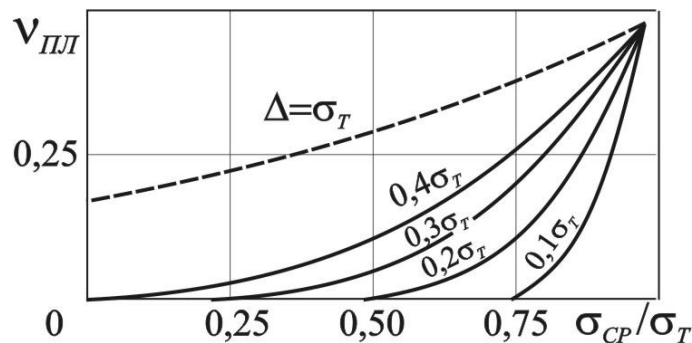


Рис. 7.5. Зависимость относительного числа деформированных зерен (агрегатов) от соотношения σ_{CP}/σ_T

Пользуясь данными таблиц, приведенных В.Т. Трощенко, найдем, что для отношения $\Delta/\sigma_T=0,2$ и $0,4$ число пластически деформированных агрегатов будет соответственно 15% и 45%. В первом приближении можно полагать, что эти величины адекватны степени крошения реального почвогрунта.

В опытах В.Т. Трощенко с металлами [129] установлено, что с увеличением объема деформированного материала, число деформированных зерен увеличивается.

В.В. Болотин [15] обобщив результаты исследований Вейбулла и др. нашел, что чем больше объем или поверхность образца (или пласта почвы), тем вероятнее найдется в нем наиболее опасный дефект, влияющий на прочность. Следовательно, чем больше размеры комка почвы, тем меньшей должна быть его удельная прочность, отнесенная к единице площади сечения.

7.5. Влияние степени крошения почвы на энергозатраты при ее обработке

П.А. Ребиндер [117] на основе обобщения гипотез Реттингера и Кирпичева-Кика обосновал энергетический закон разрушения твердых тел. Согласно обобщенному закону П.А. Ребиндера, работа на дробление твердого тела выражается уравнением (7.17).

Объем почвенного комка, полученного в результате крошения, примем равным объему куба с ребром равным $0,8d_i$ или объему шара диаметром d_i [11]. Тогда внешняя поверхность вновь образованного комка выразится

$$s_i = 6(0,8d_i)^2 \approx 5d_i^2, \quad (7.39)$$

а удельная поверхность, приходящаяся на единицу объема почвенного комка, определится по формуле

$$s'_i = \frac{s_i}{V_i} = \frac{5d_i^2}{0,5d_i^3} \approx \frac{10}{d_i}. \quad (7.40)$$

Уравнение (7.40) показывает, что между удельной поверхностью вновь образованного комка и его размером существует обратная зависимость.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Полагая равномерное крошение всего обрабатываемого слоя почвы и переходя к почвенной пробе весом Q_{Π} , определим поверхность всех вновь образованных комков

$$S = \frac{10}{Q_{\Pi}} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{d_i} = 10 \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{d_i} \approx \frac{10}{d_{CP}}. \quad (7.41)$$

С учетом имеющихся в естественно-сложенной почве первоначальных комков размером D_{CP} , приращение поверхности вновь образованных комков составит

$$\Delta S = S_K - S_H, \quad (7.42)$$

где S_H и S_K – поверхности комков соответственно до обработки и после обработки, или

$$\Delta S = 10 \sum_{i=1}^n p_i \left(\frac{1}{d_{iK}} - \frac{1}{D_{iH}} \right) = 10 \left(\frac{1}{d_{CP}} - \frac{1}{D_{CP}} \right). \quad (7.43)$$

Подставляя величину ΔS в уравнение (7.17), найдем зависимость работы на измельчение (крошение) почвы по закону Реттингера, т.е. только на образование новых поверхностей

$$A_S = 10k_s \sum_{i=1}^n p_i \left(\frac{1}{d_i} \right) aBS = 10k_s \frac{1}{d_{CP}} aBS, \quad (7.44)$$

где a и B – глубина хода и ширина захвата почвообрабатывающего орудия.

Объем почвы до и после крошения остается постоянным, т.е.

$$V = \sum_{i=1}^n 0,5d_i^3 = 0,5d_{CP}^3 = \text{const}. \quad \text{Поэтому работа на деформацию}$$

почвенных комков равна

$$A_V = 0,5k_V d_{CP}^3. \quad (7.45)$$

Полная работа на крошение почвы (по Ребиндеру) равна

$$A = 0,5k_V d_{CP}^3 + 10k_S \left(\frac{1}{d_{CP}} - \frac{1}{D_{CP}} \right) aBS. \quad (7.43)$$

Полагая коэффициенты k_V и k_S постоянными, уравнение (7.17) в общем виде можно представить графически (рис. 7.6).

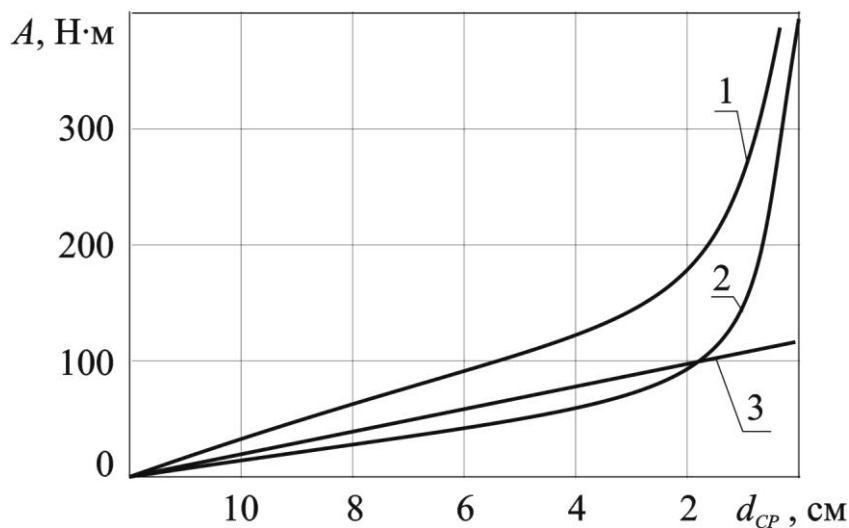


Рис. 7.6. Зависимость работы на крошение от размера почвенных комков:
1 – по закону Ребиндера; 2 – по закону Реттингера;
3 – по закону Кирпичева-Кика

Работа на деформацию почвы A_V (закон Кирпичева-Кика) выражается уравнением прямой линии, работа на образование приращения поверхности комков A_S (закон Реттингера) выражается гиперболой. Полная работа крошения почвы A (закон Ребиндера) резко повышается

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

при достижении определенной степени крошения почвы, т.е. с уменьшением размера вновь полученного почвенного комка (кривая 1 на рис. 7.6).

Если для примера рассмотреть почвообрабатывающую машину с приводными рабочими органами (фрезу или ротационный плуг), то потребная мощность для нее может быть получена из следующих соображений. Работа на крошение почвы при одном обороте ротационного барабана будет равна $A = 2\pi M_{кр}$, где $M_{кр}$ – приводной момент на валу барабана. Тогда мощность на крошение выразится зависимостью $N_{крош} = M_{кр}n$, где n – частота вращения барабана. Полная мощность на крошение будет равна

$$N_{крош} = \frac{30 \left[0,5k_v d_{CP}^3 + 10k_s \left(\frac{1}{d_{CP}} - \frac{1}{D_{CP}} \right) \right] aBSv_0 D}{2\pi}, \quad (7.47)$$

где v_0 и D – окружная скорость и диаметр барабана.

Выражение (7.47) связывает механические свойства почвенных комков (k_s , k_v), режимы работы (a , v_0) и конструктивные параметры (B , D) ротационной почвообрабатывающей машины.

По данным [94] удельная поверхностная энергия при разрушении почвенных комков ударом составляет $k_s = 2,83 \cdot 10^{-1}$ Дж/см². Удельную работу объемной деформации k_v можно ориентировочно определить по уравнению (7.21). Для условий, указанных в табл. 7.1 и $E = 2,0$ МПа значение $k_v = (4,5 \dots 6,0) \cdot 10^{-3}$ Дж/см². Используя данные фракционного анализа [137] определим мощность, необходимую для крошения почвы в зависимости от среднего диаметра вновь образованных комков (табл. 7.2)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

для ротационного плуга с параметрами $D = 0,8$ м; $B = 1,04$ м; $a = 0,20$ м [90].

Таблица 7.2

Мощность на крошение почвы

Скорость v , м/с	Подача S , м	d_{CP} , мм	D_{CP} , мм	N_V , кВт	N_S , кВт
1,33	0,126	18,7	169,2	0,65	60,7
1,12	0,190	37,9		0,61	52,2
1,33	0,258	86,2		0,65	47,4

На рис. 7.7 представлен график зависимости мощности от средневзвешенного размера почвенного комка. Мощность на крошение, полученная в экспериментах в полевых условиях условно приравнена мощности, замеренной на ВОМ трактора ($N_{ВОМ}$). В действительности часть мощности $N_{ВОМ}$ расходуется на отбрасывание почвы.

Из графиков рис. 7.7 видно, как резко увеличивается потребляемая мощность при уменьшении размера комка.

Расчеты показали (табл. 7.2), что составляющая мощности, расходуемая на объемное деформирование почвы, имеет незначительную величину (до 1% от мощности на приращение вновь образуемых поверхностей почвенных комков), поэтому ее в первом приближении можно не учитывать в расчетах.

Тогда

$$N_{\text{КРОШ}} = \frac{30k_s \left(\frac{1}{d_{CP}} - \frac{1}{D_{CP}} \right) a B v_0 D}{2\pi}. \quad 7.48)$$

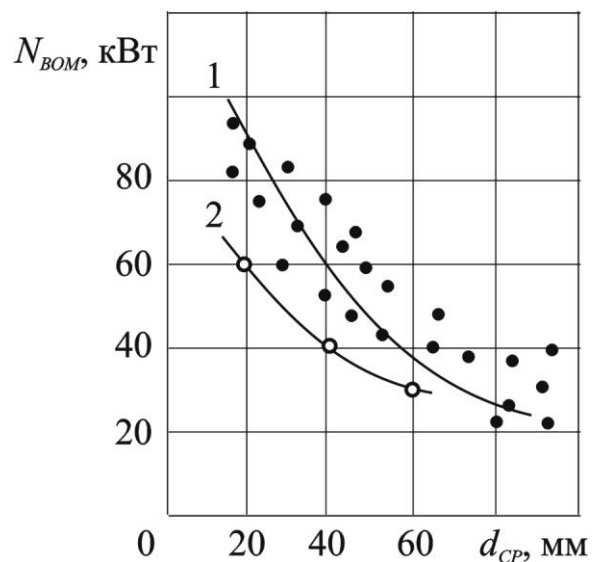


Рис. 7.7. Зависимость $N_{КРОШ} = N_{ВМ}$ от средневзвешенного размера комка почвы $d_{СР}$:
 1 – экспериментальные данные (Херсонская обл.);
 2 – расчетные данные по уравнению (7.47)

На незначительную величину мощности, идущей на объемное деформирование, указывал в М.Д. Подскребко.

С учетом сказанного, определим работу и мощность на крошение почвообрабатывающей машины с тяговыми рабочими органами, например, лемешного плуга.

Работа на крошение согласно уравнению (7.47) выразится

$$A_{Л} = 10k_s \left(\frac{1}{d_{СР}} - \frac{1}{D_{СР}} \right) aBL, \quad (7.49)$$

где L – длина пути учетного участка, проходимого плугом.

Мощность на крошение

$$N_{\text{КРОШ Л}} = 10k_s \left(\frac{1}{d_{\text{CP}}} - \frac{1}{D_{\text{CP}}} \right) aBv, \quad (7.49)$$

где v – скорость движения.

Для сравнения различных типов почвообрабатывающих машин целесообразно пользоваться величиной удельной энергоёмкости, равной затратам мощности на единицу объема обработанной почвы за определенное время [92]

$$\mathfrak{E} = \frac{N}{aBv}, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}}.$$

Для иллюстрации этого положения, на рис. 7.8 показана зависимость удельной энергоёмкости от средневзвешенного размера почвенного комка. Из приведенных данных следует, что при работе ротационного плуга на пахотных режимах с подачей 0,172...0,250 м энергоёмкость его одинакова с энергоёмкостью лемешного плуга, т.к. при этом образуются практически одинаковые размера средневзвешенных комков почвы (100...120 мм). При подаче 0,172 м и одинаковой энергоёмкости с лемешным плугом ротационный плуг обеспечивал лучшее крошение почвы ($d_{\text{CP}}=65...70$ мм), что свидетельствует о более рациональном использовании мощности двигателя трактора [100] при работе с ротационным плугом по сравнению с лемешным плугом.

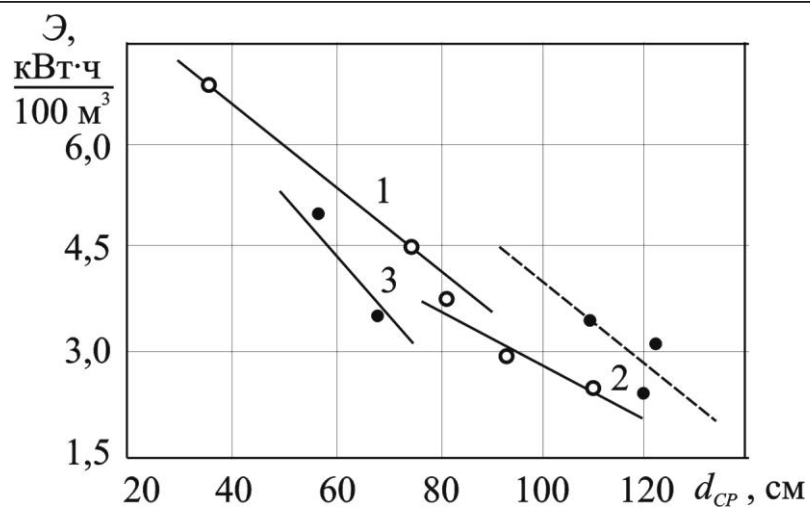


Рис. 7.8. Зависимость удельной энергоемкости лемешного плуга ПН-3-35 (пунктирные линии) и ротационного РП-200 плуга с подачами: 1 – 0,125 м; 2 – 0,250 м; 3 – 0,172 м (малогумусный чернозем, Одесская обл.)

Глава 8. Энергосберегающие способы обработки почвы

Обработка почвы была и остается наиболее энергоемкой операцией сельскохозяйственного производства, на которую расходуется от 30 до 40% всех энергозатрат в полеводстве. Вместе с тем, от качества обработки почвы и ее оптимального структурного состояния зависит урожайность сельскохозяйственных культур и экологическая безопасность не только пахотного слоя почвы, но и всей окружающей среды. Поэтому проблема энергосбережения при обеспечении высокого качества обработки почвы остается одной из главных для современного земледелия.

Многочисленные попытки ученых и практиков снизить энергозатраты на обработку почвы в рамках традиционных способов, путем оптимизации параметров и режимов работы машинно-тракторных агрегатов, совершенствования традиционных рабочих органов и почвообрабатывающих машин давали эффект в лучшем случае в пределах 5...20% [99]. Проблему энергосбережения невозможно решить с позиций классических подходов земледельческой механики, рассматривающей почву как сплошную гомогенную среду с изотропными свойствами. Эту проблему нужно решать на основе статистических теорий, учитывающих неоднородные свойства почвы, а также и нетрадиционные способы воздействия на почву.

Особенностью реальных почв является их полидисперсное многофазовое строение с пространственной решеткой из твердых частиц и почвенных водопрочных агрегатов. Следует также учитывать, что почвы имеют различное сопротивление деформациям растяжения и сжатия в соотношении примерно 1:20. Рабочие органы большинства почвообрабатывающих машин взаимодействуют с почвой по

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

преимуществу сжатием, что не позволяет эффективно использовать в качестве концентраторов напряжений многочисленные микро- и макротрещины, пустоты, инородные включения и другие дислокации пахотного слоя.

Рассмотрим наиболее эффективные на данный момент энергосберегающие способы обработки почвы, основанные не только на механическом воздействии на почву, но и других физических процессах [91].

8.1. Использование деформаций растяжения

Как было указано в главе 3, этот способ был впервые предложен проф. Д.Г. Виленским и А.Д. Афанасьевым. Однако ни их установка, ни устройство, показанное на рис. 3.6, не получили дальнейшего развития из-за низких агротехнических показателей.

В Воронежском СХИ был разработан и испытан ротационный рыхлитель-барабан с шарнирно закрепленными зубьями. Барабан приводился во вращение от ВОМ трактора. Зубья внедрялись в почву по траекториям близким к вертикали и производили отрыв стружек. Удельные энергозатраты на обработку почвы таким рыхлителем были значительно меньше, чем при использовании традиционных рыхлителей [14].

Итальянская фирма Falk выпускает почвообрабатывающие рыхлители с колебательным движением рабочих органов, имитирующих вскапывание почвы лопатой. Привод рабочих органов осуществляется от ВОМ трактора и кривошипно-шатунный механизм (рис. 8.1). Траектория рабочего органа обеспечивает почти вертикальное врезание режущей кромки, а затем производится отрыв и выброс стружки.

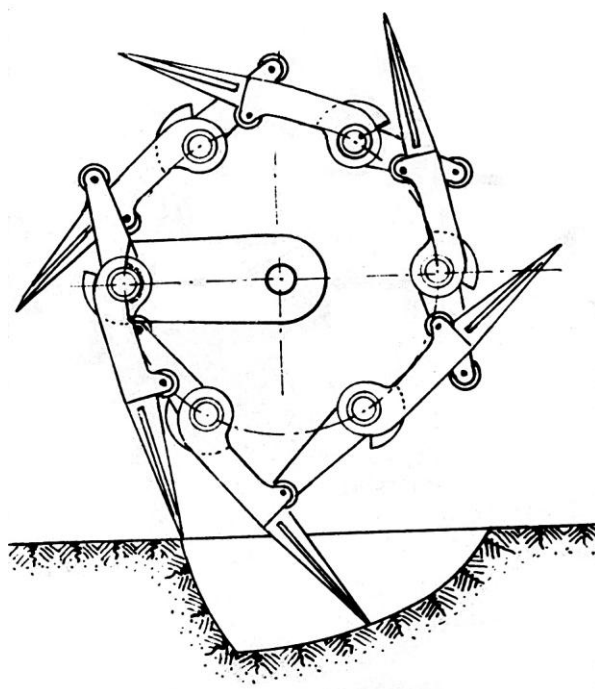


Рис. 8.1. Траектория движения рабочего органа при отрезании стружки

Благодаря формированию пласта деформацией отрыва, необходимая мощность такой машины на 30% меньше, чем имеет почвообрабатывающая фреза аналогичной ширины захвата [140].

Необходимо отметить, что перечисленные выше рабочие органы наряду с деформацией отрыва и скалывания почвы, используют также деформацию смятия при внедрении в почву режущих кромок ножей, дисков или долот. Очевидно, что нельзя полностью исключить деформацию сжатия при механической обработке почвы, но можно изменить баланс деформаций в пользу менее энергоемких деформаций растяжения. Примером может служить обоснование параметров отвала

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

плуга акад. В.П. Горячкина с учетом баланса деформаций сжатия и растяжения [33]. На таком же балансе основаны параметры современных рыхлительных стоек безотвальных плугов-рыхлителей, известных под названием «ПРН» (см. рис. 3.7).

8.2. Использование разнонаправленных деформаций

Проведенный анализ [21] показал, что снижение энергоемкости разрушения почвы достигается при вогнутой криволинейной форме продольного профиля на начальном участке рабочей поверхности клинообразного рабочего органа.

Найдем аналитическую зависимость для формы продольного профиля поверхности рабочего органа рыхлителя при условии равномерного распределения давления на него. Уравнение оси пласта, изогнутого равномерно распределенной нагрузкой q , будет иметь вид

$$y = q(x^4 - 4l^3x + 3l^4) \cdot 24EJ_z, \quad (8.1)$$

где E – модуль деформации; J_z – момент инерции пласта.

Формула (8.1) описывает вогнутую кривую, кривизна которой уменьшается от начальной к конечной точке. При развитии тенденции изменения кривизны и представлении кривизны в дифференциальной форме, вогнутая кривая закономерно переходит в выпуклую (рис. 8.2).

Деформация пласта почвы разнонаправленным нагружением реализуется посредством участков рабочей поверхности, имеющих кривизну больше и меньше нуля. Такое орудие имеет S-образную форму (рис. 8.3). В начале долото (нож) имеет минимальный угол резания и обеспечивает максимальную концентрацию напряжений для внедрения в пласт. Затем угол резания увеличивается до максимального значения в точке перегиба кривой при $k=0$.

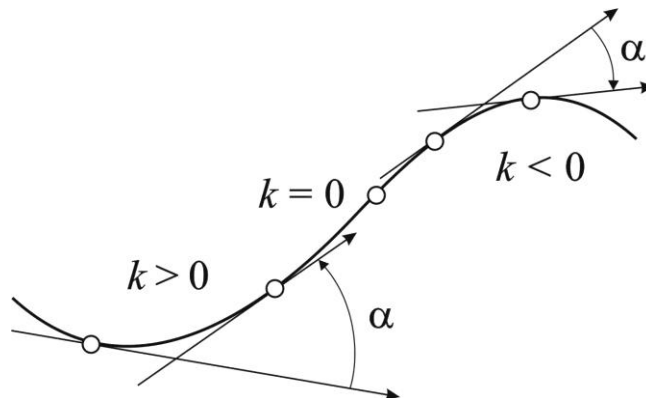


Рис. 8.2. Изменение кривизны k продольного профиля рабочей поверхности рабочего органа рыхлителя

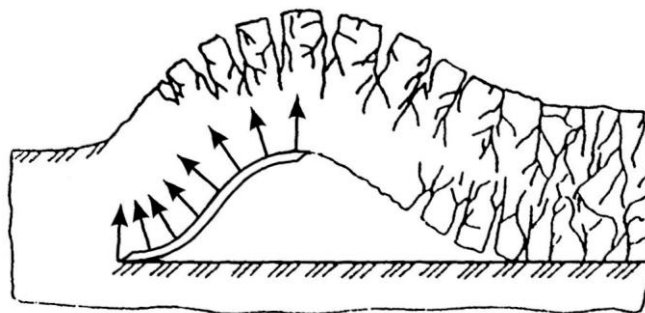


Рис. 8.3. Деформация пласта почвы разнонаправленными деформациями вогнуто-выпуклого долота

В результате использования вогнуто-выпуклой кривой для продольного профиля рабочей поверхности долота рыхлителя, пласт почвы, подвергшийся предельной деформации сжатия на вогнутом участке, деформируется растяжением на участке поверхности с противоположным знаком кривизны (см. рис. 8.3). Как было показано выше (глава 3) при последовательном наложении на пласт деформаций

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

разных знаков, его предел упругости снижается, т.е. проявляется эффект Баушингера (см. рис. 3.3), что объясняется появлением в пласте внутренних остаточных напряжений. При нагружении в противоположном направлении эти участки разрушаются раньше других, тем самым достигается снижение энергоемкости обработки почвы.

Исходя из теории Кулона-Мора дополнительное снижение энергоемкости можно получить если подвергнуть пласт одновременно с продольной деформацией деформации в поперечных сечениях. На рис. 8.4 показана картина формоизменения пласта в двух сечениях: продольном (*а*) и поперечном (*б*), полученная исходя из баланса сжимающих и растягивающих деформаций при изгибе пласта.

Из схем на рис. 8.4 видно, что при подъеме пласта по криволинейной рабочей поверхности одновременно происходит его сжатие в продольном направлении (*а*) и растяжение в поперечном направлении (*б*). Используем и разовьем эту закономерность.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние почвы под действием деформатора с долотом. Перед деформатором в почве образуется сложное напряженно-деформированное поле с определенной долей пластических деформаций. Это поле напряжений можно отобразить в виде изобар – линий равных давлений, имеющих в плане форму концентрических кривых (см. рис. 4.13). Траектории движения частиц почвы при этом имеют вид расходящихся линий перпендикулярно направлениям изобар.

Для наглядного моделирования растяжения пласта почвы в поперечных направлениях при подъеме по криволинейной поверхности рабочего органа, представим напряженно-деформированное состояние пласта в его поперечном сечении как систему радиально расходящихся частиц (рис. 8.5).

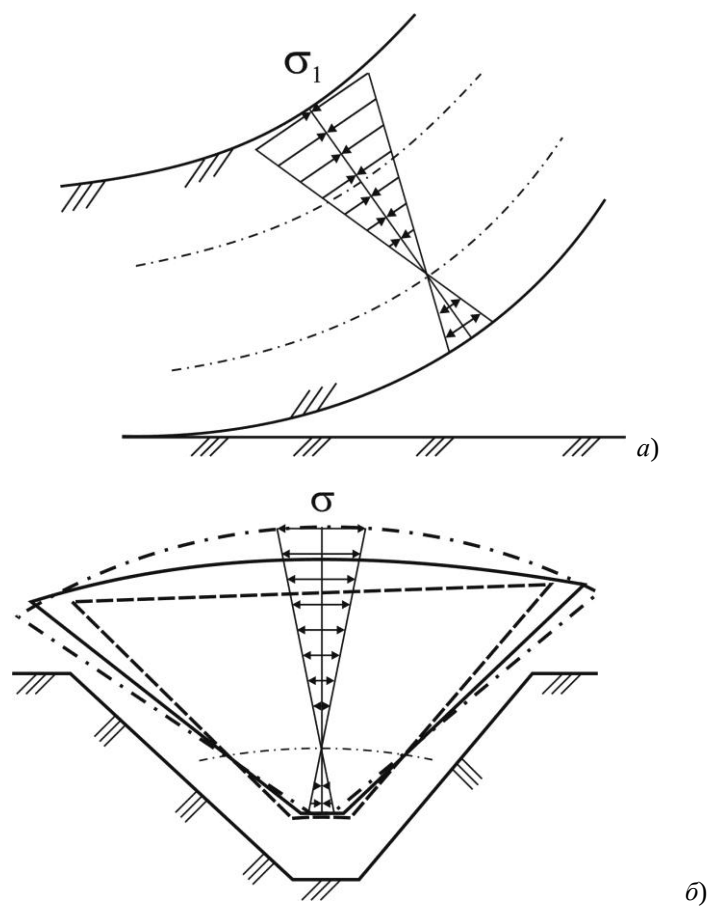


Рис. 8.4. Схема деформации пласта:
 а – в продольном сечении; б – в поперечном сечении

Из рис. 8.5, а следует, что каждая частица, проходя в радиальном направлении расстояние Δr , смещается в поперечном направлении на величину Δt . При этом главные напряжения сжатия σ_1 действуют в радиальных направлениях, а главные напряжения растяжения σ_3 в поперечных направлениях.

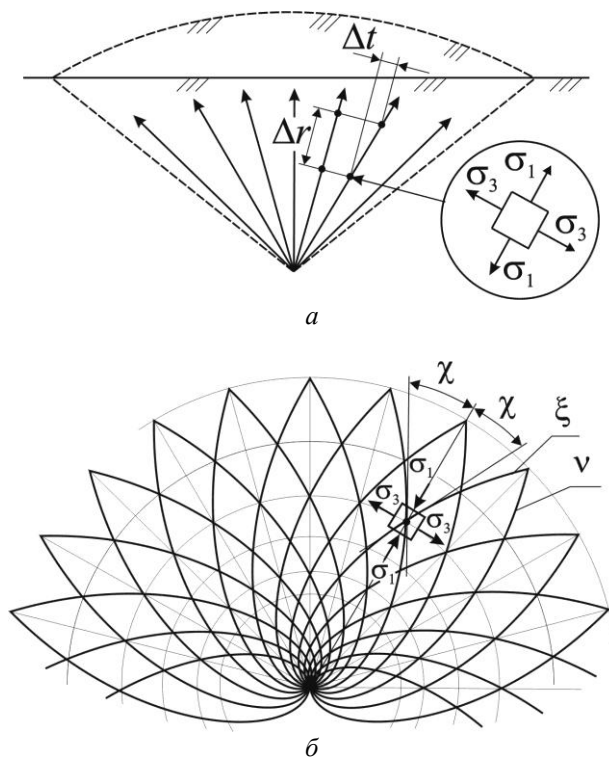


Рис. 8.5. Модели деформации пласта почвы:
 а – радиально расходящимся движением частиц;
 б – сдвигом, с образованием системы линий сдвигов в почве

Траектории главных максимальных напряжений σ_1 описывают линии (изобары), близкие к дугам концентрических окружностей. Реальные изобары имеют более сложную форму (см. рис. 4.13). Траектории равных главных минимальных напряжений σ_3 имеют вид радиально расходящихся прямых (рис. 8.5, б). Такая модель напряженно-деформированного состояния материала также соответствует

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

экспериментальным данным, полученным поляризационно-оптическим методом [7] и заложением в пласт почвы месдоз [8].

В соответствии с теорией Кулона-Мора разрушение почвы происходит с образованием линий сдвига при предельном сочетании максимального σ_1 и минимального σ_3 главных напряжений (см. рис. 3.26). Сдвиг происходит под углом $\pm\chi$ к направлению действия σ_1 . Угол χ связан с углом внутреннего трения φ_B почвы соотношением
$$\chi = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_B}{2}$$

[146]. Система линий сдвигов ξ и ν переходит в поверхности сдвигов. При радиальном расширении пласта поперечное сечение поверхностей сдвигов представляет собой семейства взаимно пересекающихся логарифмических спиралей, составляющих постоянный угол χ с траекториями радиально расходящихся частиц, что подтверждается экспериментально.

Иллюстрацией описанного напряженно-деформированного состояния может служить форма размещения семян подсолнечника (рис. 8.6). Спиралеобразное размещение семян подсолнечника устраняет избыточное напряжение между ними, обеспечивает расширение в процессе их роста и минимизирует энергоемкость процесса.

Создать в пласте почвы распределение напряжений, показанное на рис. 4.13 с соответствующими деформациями растяжения и сжатия (рис. 8.5) можно двумя способами: с использованием S-образного долота и применением деформаторов с достаточно малой шириной (площадью) по отношению к глубине обработки.

На узком долоте контактное давление максимально. Вероятность преодоления предела прочности почвы на сжатие и перехода почвы в пластическое состояние также максимально. Образующееся в почве перед долотом тело повышенного давления (нарост выпуклой формы) фактически выполняет роль рабочей поверхности. Такое тело

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

повышенного давления, образовавшееся на долоте глубокорыхлителя при обработке сухой глинистой почвы, показано на рис. 8.7. Однако энергоемкость процесса при возникновении нароста возрастает из-за большего коэффициента трения почва-почва чем почва-метал, а также свидетельствует о значительной доле энергоемкой деформации сжатия.

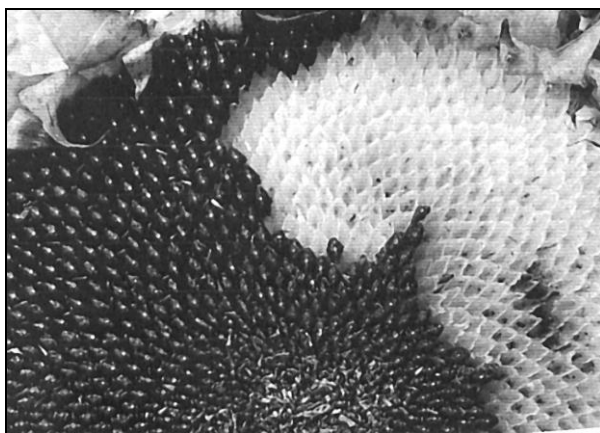


Рис. 8.6. Размещение семян подсолнечника по спиралям в процессе роста

Снижения энергоемкости обработки почвы можно достичь, если выполнить поперечное сечение долота (лапы) выпуклым, или вогнутым с переходом в выпуклое, как показано на рис. 3.4, а. Такая форма долота (лапы) препятствует образованию устойчивого нароста, вызывает перераспределение напряжений в сторону большей доли деформаций растяжения, обеспечивает разнонаправленное деформирование пласта. Разнонаправленное деформирование пласта позволяет снизить предельное напряжение сдвига на 30...40% [21]. Общая энергоемкость процесса по сравнению с работой плоских форм снижается на 12÷27%.

Лапа выпуклой формы применена в конструкции серийных чизельных плугов ПЧ-4,5 и ПЧ-2,5, S-образное долото – в рыхлителе ПРН.

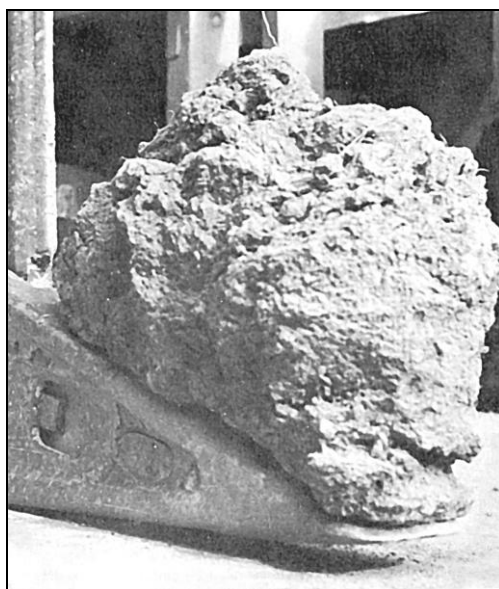


Рис. 8.7. Тело повышенного давления на долоте глубокорыхлителя
(по данным Nichols и Reaves) [141]

Снижение энергоемкости процесса рыхления почвы и повышения выровненности поверхности обрабатываемого поля можно достичь расположением стойки рыхлительного рабочего органа в зоне образования поперечных поверхностей сдвигов пласта (рис. 8.8), имеющих дугообразную форму.

Конструкция рыхлительного рабочего органа с S-образным долотом, имеющим в поперечном сечении вогнуто-выпуклую форму и дугообразной стойкой, показана на рис. 3.7. Подобными рабочими органами, разработанными ВИСХОМ и ГСКБ «Одессапочвомаш», оснащены плуги-рыхлители типа ПРН (ПРН-4-35, ПРН-5-35, ПРН-8-35) серийно выпускавшиеся с 1986 г. (рис. 8.9).

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

В настоящее время ряд фирм выпускает рыхлители с аналогичными рабочими органами, имеющими стойки дугообразной формы в поперечно-вертикальной плоскости.

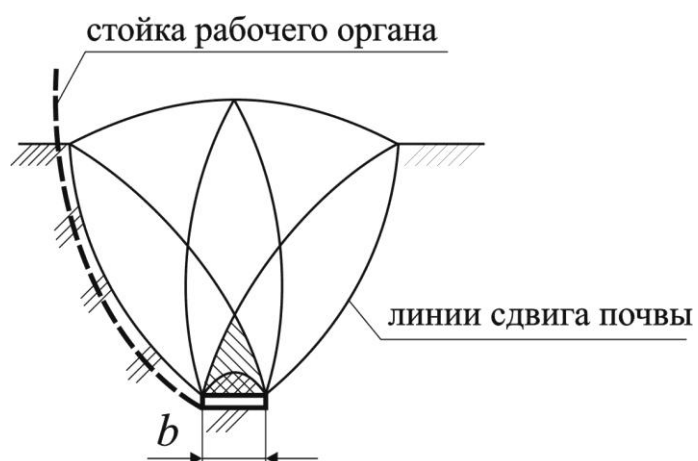


Рис. 8.8. Поверхности сдвигов пласта в поперечной плоскости (сплошные линии) и стойка рыхлительного рабочего органа (пунктирная линия)

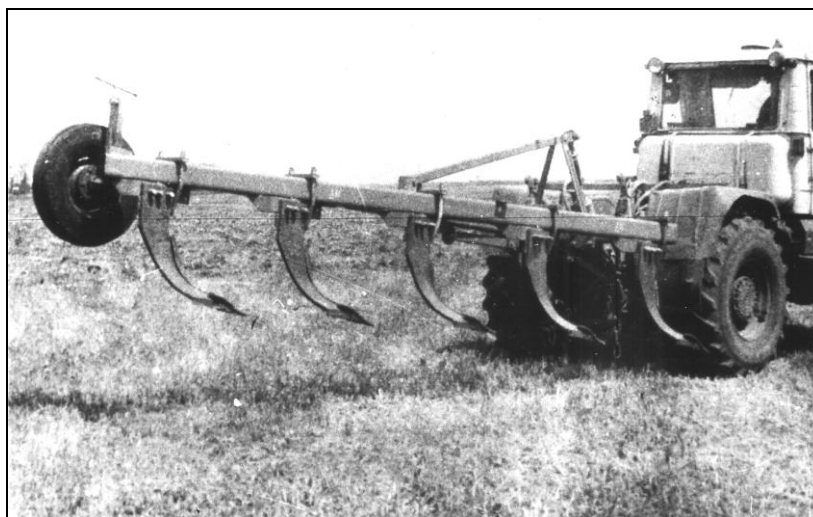


Рис. 8.9. Плуг-рыхлитель ПРН-5-35

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Принцип снижения энергоемкости крошения путем деформации почвы одновременным сжатием и растяжением в разных направлениях реализуется в поверхностях рыхлителей, кривизна которых в продольном и/или поперечном сечении уменьшается по ходу пласта. Гамма таких форм рыхлителей объединена в систематическую периодическую таблицу [21] фрагмент которой представлен на рис. 8.10.

I II III I II III поперечный профиль							
		1	2	3	4	5	6
I II III I II III поперечный профиль		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
		2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
		3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6
		4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6
		5-1	5-2	5-3	5-4	5-5	5-6
		6-1	6-2	6-3	6-4	6-5	6-6

Рис. 8.10. Периодическая таблица форм рыхлителей (фрагмент) [21]

8.3. Использование концепции «слабого звена»

В естественных почвах частицы твердой фазы образуют микро- и макроагрегаты, взаимодействующие между собой по площадкам контактов через межагрегатные связи. Прочность почвенного монолита определяется количеством площадок контакта между агрегатами и прочностью межагрегатных связей. Нагружение монолита почвы приводит к локальным разрушениям в тех местах, где напряжения превосходят прочность межагрегатных связей. В этом случае прочность обрабатываемого пласта отождествляется с разрушением слабейшего звена цепи. Кроме того, реальные почвы пронизаны множеством микро- и макротрещин, пустот и других неоднородностей, вокруг которых, как концентраторов напряжений, повышается напряжение, что приводит к локальному разрушению межагрегатных связей. Поэтому возникает задача: каким образом рационально использовать эти концентраторы напряжений для снижения энергозатрат на обработку почвы?

Одним из способов является **использование колебаний низкой и высокой частоты**, т.е. создание в пласте волнообразных импульсных нагрузок. В местах трещин или других нарушений сплошности монолита почвы волны вызывают локальные повышения напряжений. По данным [79] при длине волны нагрузок приблизительно равной длине трещины, интенсивность локальных напряжений на 20...30% больше, чем при статическом нагружении. Волны напряжений можно возбудить, прикладывая колебательную или ударную нагрузки.

При импульсном приложении нагрузки в почве распространяются упругие и пластические волны деформаций. Природа разрушения почвы под действием импульсных нагрузок пока еще не достаточно ясна. В.В. Кацыгин [54] ссылаясь на исследования Г.И. Покровского, полагал,

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

что разрушение происходит при поглощении единицей объема вещества определенных порций энергии. Поэтому любые физические процессы, сопровождающиеся переносом энергии и способные возбудить в почве волны напряжений, могут разрушить монолит почвы.

Достаточно увлажненная почва при переменных нагрузках (вибрации) способна разжижаться и переходить из вязко-пластичного состояния в жидко-текучее. П.А.Ребиндер объясняет это тем, что связанная вода переходит в свободное состояние, нарушая структурные связи между агрегатами. Переход почвы в текучее состояние сопровождается резким снижением ее прочности [30].

Большое практическое значение имеют явления так называемой усталости твердых тел, т.е. понижение статической прочности под влиянием периодических нагрузок и разгрузок с большой частотой. Такие периодические воздействия как бы «утомляют» материал, приводя к «расшатыванию» межагрегатных связей по наиболее слабым местам – локальным дефектам.

Приведем ряд примеров использования колебательного (вибрационного) воздействия на почвогрунты.

Практическим примером использования гипотезы «слабого звена» может служить устройство, приведенное на рис. 4.18. В другой конструкции (АС СССР №1046436) основной зубовой рыхлитель снабжен магнитострикционным вибратором в виде дополнительного зуба, расположенного впереди и выше основного (рис. 8.11).

В устройстве для рыхления мерзлых и прочных грунтов (АС СССР №977618) впереди основного зубового рыхлителя установлена плита с мелкими зубьями, на которой установлен дебалансный вибратор.

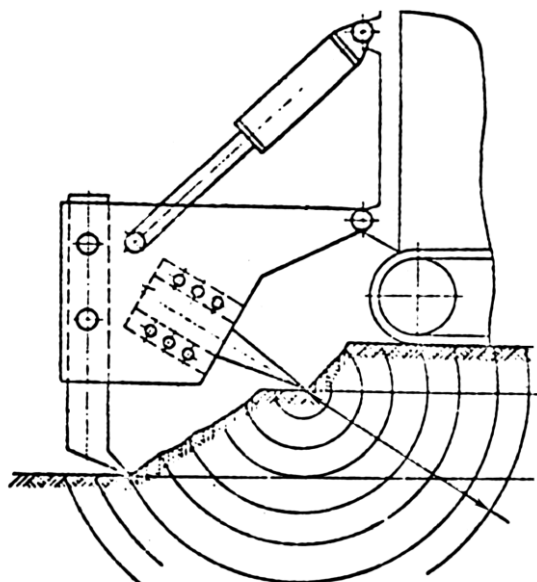


Рис. 8.11. Рыхлитель с дополнительным зубом с магнитострикционным вибратором

Гипотезой «слабого звена» можно объяснить положительный энергоэффект, получаемый при использовании почвообрабатывающих рабочих органов на упругой подвеске. Автоколебательный процесс такой стойки расшатывает межагрегатные связи в почве и снижает ее прочность. В опытах, проведенных в ВИСХОМ, получено, что наибольшее снижение тягового сопротивления культиваторной лапы на упругой подвеске достигается при колебаниях стойки в широком диапазоне частот как в продольном, так и в поперечном направлениях. Энергоэффект составляет 25...30% по сравнению с жестким креплением рабочего органа.

8.4. Применение нетрадиционных физических способов обработки почвы

Существенный рост производительности, качества крошения почвы и снижения энергозатрат можно получить при использовании нетрадиционных методов воздействия на обрабатываемую среду. Например, снизить энергозатраты можно, используя физические методы, разрушая межагрегатные связи с помощью передачи почве кинетической энергии расширяющегося газа, воздуха, движущейся под давлением воды и т.п. Определенный опыт в этой области накоплен в строительном дорожном машиностроении. В.И. Баловнев [9] приводит следующую классификацию основных направлений интенсификации строительного дорожных технологий с применением:

- газозавоздушной смазки;
- методов газовой динамики;
- методов гидродинамики.

Рабочие органы с газозавоздушной смазкой

Снижение сил трения при перемещении почвогрунтовой массы по рабочим поверхностям землеройных и почвообрабатывающих машин можно добиться с использованием газозавоздушной смазки. Воздух подается под давлением 0,1...0,15 МПа для создания газовой прослойки между обрабатываемой средой и металлической поверхностью рабочих органов. Применение газозавоздушной смазки наиболее целесообразно на плотных суглинистых и глинистых почвогрунтах, находящихся во влажном и переувлажненном состоянии. Степень снижения сил трения определяется давлением и расходом воздуха, типом почвогрунта и его влажностью. Для песчаных и супесчаных почвогрунтов коэффициент

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

трения может снижаться на 65...70%, для суглинков и глин – на 75...95% [9].

В РИСХМ [130] проводились опыты по применению газозвушной смазки с целью снижения сопротивления корпусов плуга. На экспериментальной установке использовался непрерывный наддув воздуха через перфорированную поверхность отвала корпуса плуга. Диаметр отверстий был равен 0,6 мм, давление воздуха 1,5...5 атмосфер. Снижение трения наблюдалось при работе на черноземе плотностью 1,25 г/см³, влажностью 25% при толщине пласта более 7...8 см.

Рабочие органы с газодинамическим воздействием на почвогрунты.

При газодинамическом воздействии разрушение почвогрунтов производится энергией расширяющихся газозвушных потоков. Принцип действия газодинамического интенсификатора рабочего процесса рыхления почвогрунта показан на рис. 8.12. На бульдозерном отвале 1 установлены камера сгорания 8 и нож 10 с выхлопными отверстиями. Через патрубок 6 в камеру 8 подается топливо-воздушная смесь, которая воспламеняется свечой 7 при срабатывании датчика 4.

Взрывообразное истечение продуктов сгорания обеспечивает клапан 9, который открывается при достижении максимального давления в камере 8. Поток газа через решетку ножа 10 воздействует на почвогрунт, разрушая и перемещая его. Регулирующий клапан 2, диффузор 11 и пружина 3 обеспечивают закрытие клапана 3 при зарядке камеры и быстрое открытие при сгорании смеси. Время открытия клапана 9 регулируется краном 5 в отводном канале 12, выпускающем отработанные газы в атмосферу.

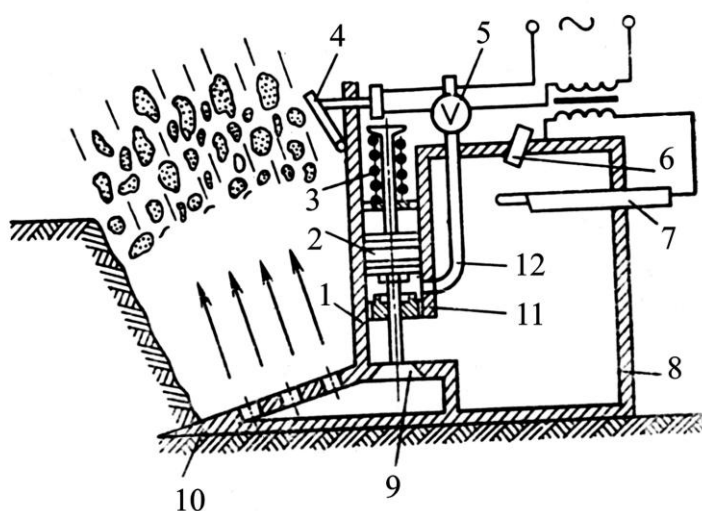


Рис. 8.12. Схема работы землеройной машины с газодинамическим интенсификатором

Перспективным для глубокого рыхления почвогрунтов является применение интенсификаторов газодинамического действия (рис. 8.13).

Рыхлитель 1 присоединен к трактору 3 с помощью навески 2. Зуб рыхлителя 1 в верхней части снабжен камерой сгорания 4 с центральным каналом 10, который заканчивается в наконечнике зуба. Камера сгорания и канал имеют форму, обеспечивающую создание детонационной ударной волны, распространяющейся вдоль по каналу после воспламенения горючей смеси. Детонационная волна, выходящая через отверстие 11, создает взрыв в грунте. Кислород и газообразное топливо (водород, ацетон) поступают от специальных источников 5. Газовоздушная смесь воспламеняется свечой зажигания 9. В цепь зажигания входят аккумуляторная батарея, катушка и кулачковый выключатель.

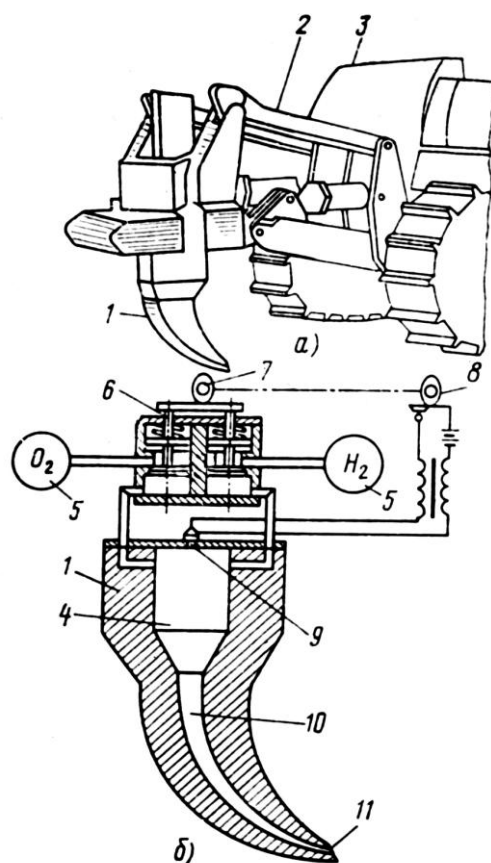


Рис. 8.13. Схема рыхлителя с газодинамическим интенсификатором

Изучение разрушения почвогрунта рыхлителем с газодинамическим интенсификатором позволило установить две фазы процесса. В первой фазе (рис. 8.14, *a*) происходит механическое деформирование зубом почвогрунта, в котором образуется прорезь. Поперечное сечение прорези в верхней части (до критической глубины)

имеет форму трапеции площадью F_1 , а в нижней части (ниже критической глубины) имеет форму прямоугольника площадью F_2 (рис. 8.14, ε).

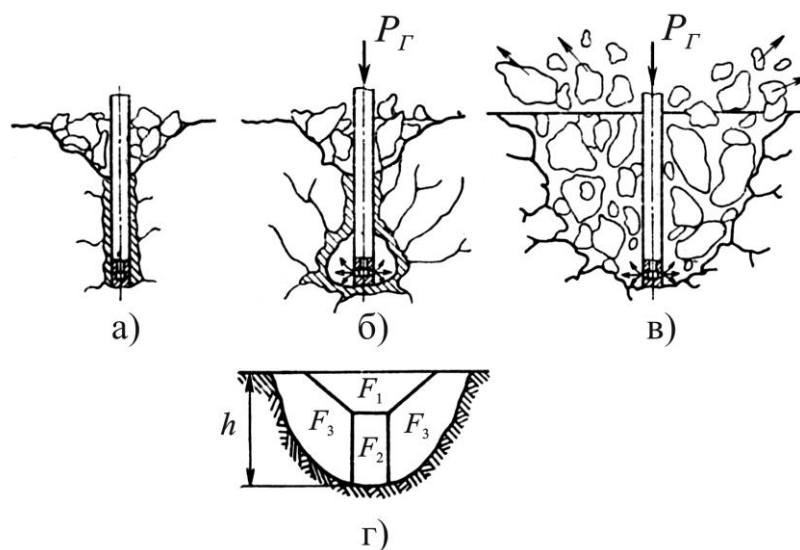


Рис. 8.14. Фазы разрушения почвогрунта рыхлителем газодинамического действия

Во второй фазе (рис. 8.14, б и в) в момент детонации происходит интенсивное разрушение почвогрунта в зонах F_2 и F_3 , при этом образованные в первой фазе трещины и разломы служат концентраторами напряжений при расширении газа в почве. Газ, внедряясь в трещину, действует как клин. Раскрытие трещин происходит в основном в сторону дневной поверхности массива почвогрунта. Поэтому разрушение почвогрунта осуществляется преимущественно за счет деформаций растяжения, т.е. наименее энергоемким образом.

Недостатками орудий газодинамического действия является цикличность работы и большое динамическое усилие отдачи. Отдачу

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

можно исключить, располагая выхлопные отверстия в боковых стенках зуба, а цикличность работы можно компенсировать установкой на раме орудия нескольких рыхлительных зубьев.

Японские ученые К. Aгaуа и К. Kawanishi провели исследования подачи воздуха и воды в рабочий орган с целью снижения тягового сопротивления рыхлителя [139]. Схема установки и рабочего органа приведена на рис. 8.15.

По результатам испытаний авторы пришли к следующим выводам:

1. При подаче воздуха через сопло в долоте рабочего органа в суглинистую почву влажностью 16% вокруг сопла образуется V-образная воронка. Однако значительного снижения энергозатрат не наблюдалось, т.к. мощность, потребляемая на закачку воздуха, превосходит снижение энергии на рыхление почвы.

2. При рыхлении той же почвы влажностью 30% образовывались большие горизонтальные трещины, идущие от носка долота. Увеличение давления воздуха приводило к резкому росту числа трещин. В этом случае снижение тягового сопротивления достигало 40...50% при снижении общей потребляемой мощности.

3. При образовании в почве горизонтальных трещин и малой ее воздухопроницаемости подачу воздуха целесообразно производить импульсами с частотой, соответствующей частоте скола почвы. В этом случае эффективность рыхления почвы возрастает, а энергозатраты снижаются.

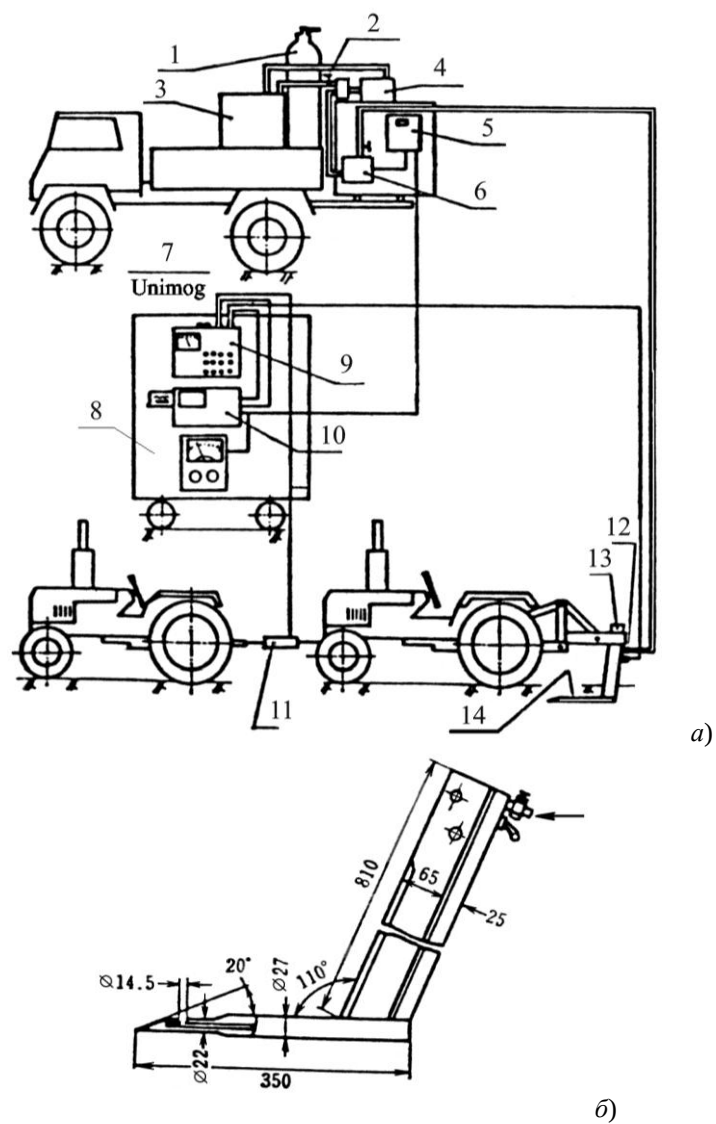


Рис. 8.15. Схема экспериментальной установки (а) и рабочего органа (б):
 1 – баллон со сжатым воздухом; 2 – кран; 3 – бак с водой; 4 – насос; 5, 6 –
 электромагнитные датчики; 7 – мобильная лаборатория; 8 – измерительное
 оборудование; 9 – усилитель; 10 – осциллограф; 11 – динамометр; 12 –
 датчик давления; 13 – рыхлитель

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

L. Martinović [149] провел исследование влияния механического и пневматического рыхления на физические свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур. Автор отметил, что пневматическое рыхление может применяться под садовые культуры и виноградники на крутых склонах и высокогорных долинах, т.е. на недоступных для трактора местах. Пневматическое рыхление обеспечивало значительное повышение пористости и коэффициента фильтрации обработанной почвы при глубине рыхления 0,6...0,7 м. Однако урожайность сельскохозяйственных культур при механическом рыхлении была выше, благодаря лучшему крошению почвы, чем при пневматическом рыхлении. Схема устройства для пневматического рыхления приведена на рис. 3.8. Автор данного исследования считает, что эффективность пневматического рыхления можно повысить за счет повышения давления воздуха, а также совмещения рыхления с внесением жидких минеральных удобрений и порошковых структурообразователей, которые будут стабилизировать трещины и пустоты, образовавшиеся при рыхлении.

В ЧИМЭСХ [24] были проведены опыты по внесению жидких минеральных удобрений путем подачи жидкости на рабочую поверхность корпусов плугов, лап культиваторов и плоскорезов. Подача жидкости на лемешно-отвальную поверхность в пределах 250...500 л/га снижала тяговое сопротивление 4-корпусного плуга при пахоте суглинистых почв на 19...25%. При подаче аммиачной воды на лапу культиватора, ее тяговое сопротивление снижалось на 34%. При подаче раствора карбамида на две лапы культиватора-плоскореза-глубокорыхлителя КПГ-250 тяговое сопротивление лапы снижалось на средних суглинках на 25%, на легких глинах – на 34%. Тяговое сопротивление орудия в целом на среднем суглинке снижалось на 17%. Результаты этих исследований позволяют считать эффективным этот способ снижения энергоемкости обработки

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

почвы, т.к. кроме повышения производительности почвообрабатывающих агрегатов и снижения расхода топлива, также повышается эффективность вносимых удобрений.

На основе открытого Л.А. Юткиным электрогидравлического эффекта [138] были предложены ряд устройств для рыхления почвы с одновременным внесением минеральных удобрений. Однако практической проверки эти устройства не проходили.

Специалисты фирмы “Deutsche Witzemachinen Gesellschaft” предложили принципиально новую конструкцию рыхлителя [150]. В конструкции рыхлителя отсутствуют стойки (рис. 8.16).

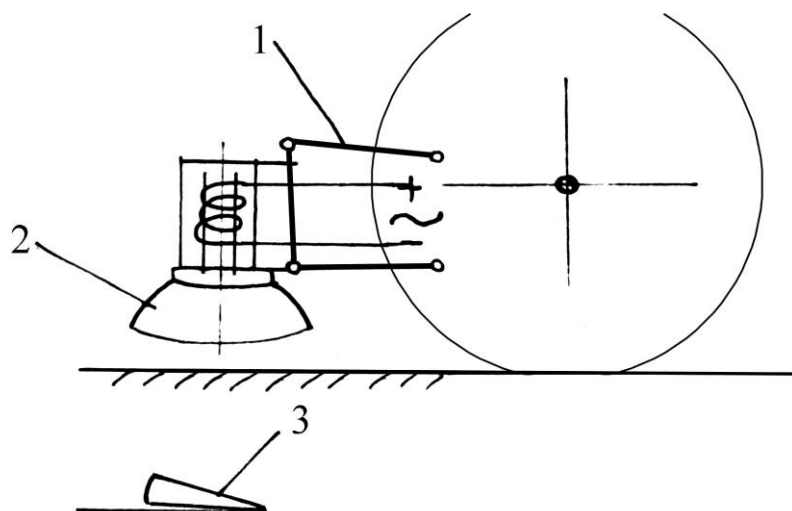


Рис. 8.16. Рыхлитель фирмы “DWG”:
1 – навеска трактора; 2 – сфера электромагнита; 3 – долото рыхлителя

Связь долота с рамой машины осуществляется посредством мощного электромагнита, установленного на навеске трактора. Для

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

направленного воздействия магнитного поля порядка $15 \cdot 10^5$ Гаусс электромагнит закрыт полусферой из специальных материалов. Взаимодействие долота и электромагнита подобно устройствам для поездов на магнитной подушке. При движении трактора долото перемещается под почвой и производит ее рыхление, не нарушая поверхностный слой поля. Электромагнит в состоянии удерживать долото на глубине до 0,5 м. Снижение тягового сопротивления такого рыхлителя достигается благодаря отсутствию стоек и меньшей зоны рыхления. Недостатком электромагнитного рыхлителя является опасность потери долота при остановке генератора, а также то, что обрабатываемое поле должно быть очищено от металлических предметов, в противном случае они нарушат процесс рыхления почвы.

8.5. Адсорбционные эффекты снижения прочности почвогрунтов

При изучении резания металлов было отмечено, что адсорбция молекул поверхностно-активных веществ из смазывающих растворов уменьшает твердость обрабатываемого материала, облегчая и ускоряя пластическую деформацию [70]. Для объяснения этого явления Б.В. Дерягин предложил гипотезу о расклинивающем действии поверхностно-активных веществ. Схема расклинивающего действия показана на рис. 8.17.

Раскрытие микротрещин происходит вследствие стремления к утолщению пленок жидкости, проникших в микротрещины твердого вещества. Величина расклинивающего давления весьма высока и составляет по данным Б.В. Дерягина 100 МПа.

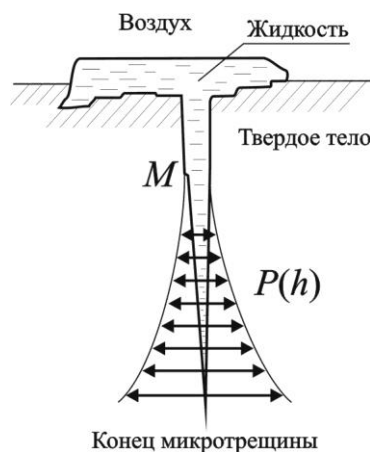


Рис. 8.17. Распределение расклинивающего давления жидкости по глубине трещины (по Б.В. Дрягину)

Дальнейшее развитие теория адсорбционного эффекта получала в трудах П.А. Ребиндера [114], согласно которому коагуляционные структуры (в том числе почвогрунты) обладают тиксотропными свойствами, т.е. способны к обратному восстановлению после механического разрушения.

Как известно, реальные почвы в естественном состоянии обладают пространственной решеткой из твердых частиц и почвенных агрегатов, а также множеством статистически распределенных микро- и макротрещин. В процессе деформации на основе этих дефектов, как концентраторов, в деформируемом пласте почвы развиваются поверхности разрушения, которые после разгрузки могут вновь смыкаться под влиянием молекулярных сил (электрической, химической и другой природы).

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Адсорбционное воздействие жидкой поверхностно-активной среды понижает поверхностную энергию частиц и агрегатов, способствует образованию новых поверхностей разрушения. Кроме того, адсорбционная жидкость, проникая в микро- и макротрещины, стабилизирует эти дефекты, ликвидируя их обратное смыкание в период разгрузки, что значительно понижает прочность твердых тел.

Для металлов активная среда создается введением в жидкие углеводороды любого поверхностно-активного вещества. Наибольший эффект достигается при добавке 0,2% олеиновой кислоты или цетилового спирта.

Специальных опытов по выявлению адсорбционного эффекта для почв пока не проводилось. В этом плане необходимы исследования природы связности почв, как с естественной, так и предварительно разрушенной структурой, а также механизма структурообразования почв и природы прочностных свойств, в связи с водосодержанием. Возможно, что водные растворы минеральных удобрений могут быть поверхностно-активной средой.

Изложенные традиционные и нетрадиционные способы снижения затрат энергии на обработку почвы могут служить основой для выбора рациональных методов энергосберегающих технологий для различных видов обработки почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзеншток И.Я. О физической теории резания грунтов // Горный журнал, № 5, 1949.
2. Амплевская С.В. Определение удельного сопротивления почвы с помощью модели плужного корпуса // Сб. научно-исследовательских работ НИИ механизации и электрификации орошаемого земледелия, вып. 1, Ташкент, 1969.
3. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория удара и расчет ударных систем. – М.: Наука, 1969.
4. Андреев С.Е. и др. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. – М.: Metallurgizdat, 1959.
5. Арутюнян К.Г. К динамической теории клина, работающего в почвенной среде // Докл. МИИСП, т. III, вып. 1, 1966.
6. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1976.
7. Бабенков И.С. и др. Исследование взаимодействия бурового инструмента методом фотоупругости. – М.: Недра, 1970.
8. Багиров И.З. Исследование процесса взаимодействия грунта с клином на повышенных скоростях движения // Вопросы сельскохозяйственной механики, т. 16. – Минск: Урожай, 1967.
9. Баловнев В.И. Дорожно-строительные машины с рабочими органами интенсифицирующего действия. – М.: Машиностроение, 1981.
10. Баландинский В.Л. Динамическое разрушение прочных грунтов. – Киев: Будивельник, 1972.
11. Бауман В.А. и др. Роторные дробилки. – М.: Машиностроение, 1973.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

12. Бахтин П.У. Проблемы обработки почвы. – М.: Знание, 1969.
13. Бахтин П.У. Физико-механические и технологические свойства почв. – М.: Знание, 1971.
14. Беляев В.И., Сулимин И.П. Удельные энергозатраты движителя-рыхлителя // МЭСХ, № 3, 1981.
15. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. М.: Изд. литер. по строительству, 1965.
16. Березанцев В.Г. и др. Исследование прочности песчаных оснований. – М.: Трансжелдориздат, 1958.
17. Вагин А.Т. Напряжения и деформации в массиве почвы под действием сосредоточенной нагрузки // Вопросы сельскохозяйственной механики, т. XV – Минск: Урожай, 1965.
18. Вагин А.Т. К вопросу взаимодействия клина с почвой // Вопросы сельскохозяйственной механики, т. XV. – Минск: Урожай, 1965.
19. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение, 1971.
20. Ветров Ю.А. и др. Разрушение прочных грунтов. – Киев: Будивельник, 1972.
21. Ветохин В.И. Обоснование формы и параметров рыхлительных рабочих органов с целью снижения энергозатрат на обработку почвы // Автореферат дисс. канд. техн. наук. – М., 1992.
22. Волкановский В.С. Тяговая характеристика почвообрабатывающих орудий // МЭССХ, № 1, 1937.
23. Виноградов В.И. Сопротивление рабочих органов лемешного плуга и методы снижения энергоемкости пахоты // Автореферат дисс. докт. техн. наук. – М., 1969.
24. Виноградов В.И., Семенов Г.А. Исследование динамической прочности почвы // МЭСХ, № 6, 1968.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

25. Виленский Д.Г., Афанасьев А.Д. Новый принцип механического подъема почвы // Уч. зап. МГУ. – М., 1946.
26. Вильямс В.Р. Основы земледелия // Собр. сочинений. – М., 1948.
27. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978.
28. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е. Теоретические основы механики грунтов. – М.: Стройиздат, 1948.
29. Гологурский, Т.М. Технологические процессы в почве при ее обработке / Т.М. Гологурский. - Петроград: Отдел машиноведения с.-х. Ученого комитета, 1916.
30. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. – М.: Изд по строительству, 1971.
31. Горячкин В.П. Общая теория орудий // Собр. сочинений, т. 1, М.: Колос, 1965.
32. Горячкин В.П. Теория плуга. – М.: Промиздат, 1927.
33. Горячкин В.П. Рациональная формула силы тяги плугов // Собр. сочинений, т. 2, М.: Колос, 1965.
34. Горячкин В.П. Учение об ударе // Собр. сочинений, т. 1, М.: Колос, 1965.
35. Горячкин В.П. Теория разрушения почв // Собр. сочинений, т. 2, М.: Колос, 1965.
36. Глубокое рыхление и щелевание эродированных, уплотненных и временно переувлажненных почв // Рекомендации. Составитель Турецкий Р.Л. и др. – Минск, 1988.
37. Гудков А.Н. Теоретические основы вспашки твердых почв и обоснование конструкции плуга // Материалы НТС ВИСХОМ, вып. 5, 1959.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

38. Гудков А.Н. Обоснование методов обработки почвы // Сб. трудов по сельскохозяйственной механике, т. X, 1968.
39. Гупта С.П., Пандья А.С. Уточненный расчет тягового сопротивления почвообрабатывающих орудий с учетом распространения упругих волн в почве // Trans. ASAE, т. 10, № 3, 1976.
40. Далин А.Д., Павлов П.В. Ротационные почвообрабатывающие и землеройные машины. – М.: Машгиз, 1950.
41. Деграф Г.А. К определению значений предельных рабочих скоростей почвообрабатывающих машин // Вестник науки, № 11, 1966.
42. Доспехов Б.А., Панов И.М., Пупонин А.И. Минимальная обработка почвы в Нечерноземной зоне // Известия ТСХА, вып. 1, 1976.
43. Доспехов Б.А., Бузмаков В.В. Современные проблемы земледелия. – М.: Колос, 1978.
44. Жук Я.М., Рубин В.Ф. О сопротивлении почвы различным деформациям // Сб. научно-исслед. работ ВИСХОМ, вып. 3, М.-Л.: Гос. научн.-техн. изд. машиностроительной литер., 1940.
45. Заславский М.Н. Эрозия почв. – М.: Мысль, 1978.
46. Завражнов А.А. Обоснование методов оценки и расчета параметров упругих стоек чизельных культиваторов // Автореферат дисс. канд. техн. наук. – М., 1988.
47. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 1968.
48. Зеленин А.Н. Физические основы теории резания грунтов. – М.: Машиностроение, 1968.
49. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керров И.П. Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975.
50. Зворыкин К.А. Работа и усилие для отделения металлических стружек. – Изд. «Русская типография», 1893.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

51. Ионов В.Н., Огибалов П.М. Напряжения в телах при импульсном нагружении. – М.: Высшая школа, 1975.
52. Ишлинский А.Ю. Разрушение не вполне упругих материалов // Уч. записки МГУ, т. 1, Механика, 1946.
53. Извеков В.П. Предотвратить экологическую катастрофу // Земледелие, №4, 1991.
54. Кацыгин В.В. Общие закономерности сопротивления почвогрунтов деформации // Вопросы сельскохозяйственной механики, т. XIII. – Минск: Урожай, 1964.
55. Кацыгин В.В. К вопросу исследования процессов обработки почвы // Вопросы земледельческой механики, т. VII. – Минск: Изд. сельхозлит. БССР, 1961.
56. Качинский Н.А. Определение удельного сопротивления почвы при пахоте по сопротивлению почвы расклиниванию и подрезанию // Почвоведение, № 9, 1939.
57. Качинский Н.А. Свойства почвы как фактор, определяющий условия работы сельскохозяйственных машин // Почвоведение, № 8, 1937.
58. Качинский Н.А. Физика почв. – М.: Высшая школа, 1965.
59. Кильчевский Н.А. Теория соударения твердых тел. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949.
60. Кирюхин В.Г. Исследование деформации почвы при вспашке // Материалы НТС ВИСХОМ, вып. 7, М.: ОНТИ, 1969.
61. Кольских Т. Волны напряжений в твердых телах. – М.: ИЛ., 1955.
62. Ковалев А.Г., Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Сельскохозяйственные материалы (виды, свойства, состав) // Учебное пособие. – М.: Родник, 1968.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

63. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. – М.: Высшая школа, 1976.
64. Ковда В.А. Факторы, снижающие плодородие черноземов и пути их устранения // Обзорная информация. – М., 1987.
65. Кузьмин В.И. Исследование реологических свойств грунтов применительно к вопросам механизации почвообработки // Автореферат дисс. канд. техн. наук. – Ереван, 1971.
66. Кушнарев А.С., Макаров И.П. Последствия переуплотнения пахотных почв // Вестник сельскохозяйственной науки, № 8, (396), 1989.
67. Кушнарев А.С. Механико-технологические основы процесса воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий на почву // Автореферат дисс. докт. техн. наук. – Челябинск, 1981.
68. Кушнарев А.С., Кузьмин В.И. К вопросу определения мгновенного модуля упругости почвы // Доклады научно-технической конференции по проблеме «Комплексная механизация освоения каменистых земель». – Ереван, 1969.
69. Луканин Ю.В. Деформация почвы при ее обработке // Автореферат дисс. канд. техн. наук. – Волгоград, 1963.
70. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. – Томск: Изд. «Красное знамя», 1944.
71. Максимов И.И. Прогноз эрозионных процессов, техника и технология для обработки склоновых земель // Автореферат дисс. докт. техн. наук. – М., 1981.
72. Мальверн Л. Распространение продольных пластических волн с учетом скорости деформации // Сб. «Механика», № 6 (10), 1951.
73. Мацепуро М.Е., Манюта И.В. Вопросы земледельческой механики, т. XI // Сб. «Механика» № 6 (10), 1951. – Минск: Госиздат БССР, 1959.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

74. Мацепуро М.Е., Кацыгин В.В. О коэффициенте полезного действия // Вопросы механики, т. VII, Минск: Гос. изд. с.-х. литер., 1961.
75. Мацепуро М.Е. и др. Исследование деформации почв и грунтов при вдавливании штампов // Тр. ВИМ, т. 69, 1965.
76. Медведев В.В. Экологические критерии механической обработки почвы // Сб. научн. тр. – М.: Агропромиздат, 1991.
77. Методические указания по проектированию систем почвозащитного земледелия для районов распространения водной и водно-ветровой эрозии европейской территории страны. – М.: Агропромиздат, 1986.
78. Месчан С.Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. – М.: Недра, 1978.
79. Математические основы теории разрушения. // Под ред. Г. Любовиц. – М.: Мир, 1975.
80. Морозов Д.Р. О методах определения удельных сопротивлений почв плотномером Горячкина // МЭССХ, № 7, 1940.
81. Научные основы мониторинга земель Российской Федерации. – М.: Изд. АПЭК, 1992
82. Николаев Г.А. Влияние почвенных условий на тяговое сопротивление плугов // МЭССХ, № 2-3, 1939.
83. Нагорный Н.Н., Белоткач М.П. Энергетическая оценка почвообрабатывающих орудий // Тракторы и сельхозмашины, № 7, 1980.
84. Новиков Ю.Ф. Некоторые вопросы теории деформирования и разрушения почвы под действием двугранного клина // Тр. ЧИМЭСХ, вып. 46, 1969.
85. Новиков Ю.Ф., Истрати А.К. Эволюция техники земледелия и проблема эрозии. – Кишинев: Изд. «Штиинца», 1983.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

86. Некрасов П.А., Антипин А.И. Работа фрезы и плуга. – М.: Сельхозгиз, 1931.

87. Новиков Ю.Ф., Чебан А.И. О деформациях, возникающих в почве под действием клина // Сб. «Исследование рабочих органов с.-х. машин». – Ростов-на-Дону, 1963.

88. Новиков Ю.Ф. Исследование напряженного состояния почвы в процессе вспашки // Сб. научных трудов РИСХМ, вып. 1, 1967.

89. Огрызков Е.П. Анализ работы лезвий плужных лемехов // Тракторы и сельхозмашины, № 11, 1959.

90. Орнатский Н.В. Механика грунтов. – М.: Изд. МГУ, 1950.

91. Панов А.И. Нетрадиционные способы обработки почвы // Тракторы и сельскохозяйственные машины, № 12, 1998.

92. Панов И.М. Энергобаланс МТА с ротационной почвообрабатывающей машиной // Тр. ВИСХОМ, вып. 85. – М.: ОНТИ, 1975.

93. Панов А.И., Селиванов В.Г. Совершенствование методов энергетической оценки тепличных почвообрабатывающих машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины, № 6, 1997.

94. Панов И.М. Механико-технологические основы расчета и проектирования почвообрабатывающих машин с ротационными рабочими органами // Автореферат дисс. докт. техн. наук. – Челябинск, 1983.

95. Панов И.М., Мелихов В.В. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. – М.: Изд. ЦИНТИАМ, 1963.

96. Панов И.М., Шмонин В.А., Мелихов В.В. Результаты исследований ротационного плуга РП-200 и роторного плуга ПОД-5-35 // Научн. тр. ЧИМЭСХ, вып. 33, 1970.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

97. Панов И.М., Шмонин В.А. Крошение почвы плугом с комбинированными плужными корпусами // Тракторы и сельхозмашины, № 2, 1970.

98. Панов И.М., Кебере Эстифанос. Теоретические и экспериментальные основы косвенного метода определения удельного сопротивления почв при вспашке. – М.: Изд. ВИСХОМ, 1994.

99. Панов И.М. Актуальные проблемы развития современного земледелия и сельскохозяйственных орудий // Тракторы и сельхозмашины, № 1, 1993.

100. Панов И.М., Токушев Ж.Е. Теория, конструкция и расчет ротационных почвообрабатывающих машин. – Кокшетау: Изд. Кокшетауского университета, 2005.

101. Панов И.М. Современное состояние и пути развития техники для новых технологий возделывания сельскохозяйственных культур // Итоги науки и техники. Серия «Тракторы и сельскохозяйственные машины и орудия», т. 5. – М.: ВИНТИ, 1990.

102. Пигулевский М.Х. Основы методики изучения физико-механических свойств почвы. – М.: Изд. ЛОВИУА ВАСХНИЛ, 1936.

103. Подскребко М.Д. Влияние скорости деформации на сопротивление почвы растяжению // Тр. ЧИМЭСХ, вып. 17, 1964.

104. Покровский Г.И., Некрасов А.А. Статистическая теория грунтов // Вестник ВИА, 1934.

105. Покровский Г.И. К теории работы плуга // Почвоведение, № 56, 1936.

106. Погорелый Л.В. Инженерные методы испытаний сельскохозяйственных машин. – Киев: Техника, 1981.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

107. Пронин А.Ф. Удельное сопротивление плугов и научные основы, определяющие структуру парка почвообрабатывающих машин // Автореферат дисс. докт. техн. наук. – М., 1983.
108. Покровский Г.И. и др. Исследование сжатия почвы при различных скоростях деформации // Почвоведение, № 1, 1938.
109. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого тела. – М.: Наука, 1988.
110. Радин Ю.П., Панов И.М. Обработка рисовых чеков ротационным плугом // МЭССХ, № 4, 1976.
111. Ревут И.Б. Физика почв. – Л.: Колос, 1972.
112. Ревут И.Б., Козлова Л.Д. Фрезерная обработка почвы и ее влияние на биологическую активность // Сб. трудов АФИ. – Л.: Колос, 1967.
113. Романенко Г.А. Актуальные вопросы развития земледелия // Земледелие, № 7, 1986.
114. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. – М.: Знание, 1958.
115. Ревут И.Б. Новое в технологии обработки почвы // Вестник сельскохозяйственной науки, № 7, 1969.
116. Тимошенко С.П., Гудьер Д. Теория упругости. – М.: Наука, 1979.
117. Ребиндер П.А. Физико-химические исследования процессов деформации твердого тела. – М.: Машгиз, 1947.
118. Савиных В.Н. Исследование явления релаксации в почвогрунтах // Тр. ЦНИМЭСХ, т. VII. – Минск: Урожай, 1969.
119. Сапожков Н.М. Пластические деформации и их значение в расчетах деталей машин. – М.: Машгиз, 1951.
120. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1976.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

121. Синеоков Г.Н. Сопротивления почвы, возникающие при ее обработке // Дисс. докт. техн. наук. – М., 1954.
122. Синеоков Г.Н. Проектирование почвообрабатывающих машин. – М.: Машиностроение, 1965.
123. Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. – М.: Машиностроение, 1977.
124. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Гостехтеориздат, 1954.
125. Станевский В.П. О физической сущности влияния скорости на силу резания грунтов // Сб. «Горные, строительные и дорожные машины», вып. 4. – Киев: Техника, 1966.
126. Соучек Р., Аниш З., Бюшель Р. Определение показателей качества крошения почвы рабочими органами почвообрабатывающих машин. – Ростов-на-Дону: Изд. РИСХМ, 1985.
127. Токушев Ж.Е. Теория и расчет орудий для глубокого рыхления плотных почв. – М: Изд. «ВИСМА», 2003.
128. Троицкая М.Н. Пособие к лабораторным работам по механике грунтов. – М.: Изд. МГУ, 1961.
129. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1981.
130. Фомин В.И., Чебан А.И. Газостатическая смазка рабочих органов почвообрабатывающих машин // Сб. «Конструирование с.-х. машин». – Ростов-на-Дону, 1969.
131. Уфиркин Н.А. О возможности снижения тягового сопротивления плуга при ударном воздействии на почву // Научн. - техн. бюллетень ВИМ, вып. 7-8, 1970.
132. Царицын В.В. К вопросу о физических основах разрушения горных пород // Труды совещания по координации исследований в области

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

отделения от массива угля и пород. – Киев: Изд. Киевского политехн. института, 1968.

133. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.-Л.: Гос. изд. литер. по строит. и архитект., 1951.

134. Швец В.Б. и др. Справочник по механике и динамике грунтов. – Киев: Будивельник, 1987.

135. Щербаков А.П. и др. Научные основы экологически безопасных технологий обработки почвы // Сб. научн. трудов ВАСХНИЛ. – М.: Агропромиздат, 1991.

136. Щучкин Н.В. Лемешные плуги и луцильники. – М.: Машгиз, 1952.

137. Юзбашев В.А. Исследование работы ротационного плуга с целью снижения его энергоемкости // Автореферат дисс. канд. техн. наук. – М., 1973.

138. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986.

139. Araya K., Kawanishi K. Draft reduction of subsoiler by injection air to break down soil // Journal of the Society of Agricultural Machinery Japan, v. 43, N 1, 1981.

140. Baraldi G., Pezzi F. Caratteristiche tecniche e prestazioni delle vangatrici // L'Informatore Agrario, v. 40, 1987.

141. Gill W.R. Soil dynamics in tillage and traction. – Washington, Agricultural Research US department of Agriculture, 1976.

142. Koolen A.J. Soil loosening processes in tillage. Analysis and predictability. Tillage Laboratory Agriculture University Wageningen, Netherlands, 1977.

143. Rathje J. Der schnittvorgang in Sande // Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, H. 350, 1931.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

144. Stafford J.V., Geikie A. Implement configuration to loosen soil by inducing tensile // Soil and Tillage Research, V. 9, N 4, 1987.
145. Lucius J. Bestimmung des Einflusses der Verformungsgeschwindigkeit auf die Bruchspannung im Boden // Deutsche Agrartechnik, N 11, 1971.
146. McKyes E. Soil cutting and tillage. – Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, 1985.
147. Nichols M.L. The dynamic properties of Soil // Agric. Engin., N 13, 1932.
148. Soehne W. The deformability of durable soil // Grundlagen der Landtechnik, N 3, 1952.
149. Martinovič L. Effect of mechanical and pneumatic subsoil loosening on the physical properties and drop fields of different types of soil // 9th International Conference of soil tillage research Organization, Yugoslavia, 1982.
150. Ridky K. Vliv rotacni a pluzni technologie orby na puolni microform // Zemedelska technika, v. 10 (XXXVIII), 1964.
151. Stranak A., Klaska F. Vliv rotacni a pluzni technologie orby na dynamiku vlastnosti a její zezim // Zemedelska technika, v. 10 (XXXVIII), 1964.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Экологические аспекты механической обработки	
почвы	7
Глава 2. Почва как объект механической обработки	15
2.1. Краткие сведения о физико-механических свойствах	
почвы	15
2.2. Обоснование расчетной модели почвы	20
Глава 3. Напряженно-деформированное состояние и прочность	
почв	23
3.1. Природа прочности и деформации почвогрунтов	24
3.2. Сопротивление почв различным деформациям	25
3.3. Сопротивление почв сжатию	41
3.4. Сопротивление почвы сдвигу	67
3.5. Теория прочности Кулона-Мора	69
Глава 4. Физические процессы механики почв	81
4.1. Физические процессы при взаимодействии рабочих	
органов с почвой	81
4.2. Резание почв без отделения стружки	83
4.3. Резание почвы с отделением стружки	99
Глава 5. Методы расчета сил сопротивления резанию почвы ...	117
5.1. Аналитические методы определения сил сопротивления ...	117
5.2. Сопротивление двугранного клина по теории	
Г.Н. Синеокова	120
5.3. Рациональная формула силы тяги В.П. Горячкина	125
5.4. Косвенные методы определения силы тяги	
почвообрабатывающих машин	130

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПОЧВ

Глава 6. Динамические процессы механики почв	142
6.1. Влияние скорости на взаимодействие рабочих органов с почвой	142
6.2. Элементарная теория удара	148
6.3. Волновая теория удара	155
6.3.1. Упругие колебания в почве	155
6.3.2. Пластические волны напряжений в почве	161
6.4. Реологические свойства почвы	177
Глава 7. Процесс крошения почвы	194
7.1. Определение фракционного состава почвы	194
7.2. Элементы теории дробления (крошения) почвы ротационными рабочими органами с принудительным приводом	199
7.3. Аналитические методы определения степени крошения почвы. Гипотеза В.В. Кацыгина	208
7.4. Концепция слабого звена	212
7.5. Влияние степени крошения почвы на энергозатраты при ее обработке	215
Глава 8. Энергосберегающие способы обработки почвы	223
8.1. Использование деформаций растяжения	224
8.2. Использование разнонаправленных деформаций	226
8.3. Использование концепции «слабого звена»	236
8.4. Применение нетрадиционных физических способов обработки почвы	239
8.5. Адсорбционные эффекты снижения прочности почвогрунтов	248
ЛИТЕРАТУРА	251
ОГЛАВЛЕНИЕ	264

Наукове видання

ПАНОВ Іван Михайлович, **ВЕТОХІН** Володимир Іванович

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ ҐРУНТІВ

Монографія

Друкується в авторській редакції

Підписано до друку 18.09.08
Формат 60x84 1/16
Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman
Ум. др. арк. 18,5. Обл.-вид. арк. 10,5
Наклад 300 прим. Зам. № 377/09

Видавництво «Фенікс»
03680, м. Київ, Вул. Шутова, 13Б,
Свідоцтво ДК № 271 від 07.12.2000 р.
www.phoenix-druk.kiev.ua
Друкарня ПП «Ростислав-С», Київ, вул. Горького, 56