

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ БИОРЕСУРСОВ И
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

В. П. Ковбаса, А. М. Аюбов,
Аль-Хазаали Хайдер Раад Надим

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ
БЕСТРАНШЕЙНОЙ УКЛАДКИ ОРОСИТЕЛЯ С
ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫМ ЭКРАНОМ

Монография



Мелитополь –2018

УДК 631.3: 631.674

Рецензенты:

Чаусов Н. Г., профессор, доктор технических наук, профессор кафедры механики Национального университета биоресурсов и природопользования Украины

Барановский В. Н., профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования сварочного производства Тернопольского Национального технического университета им. И. Пулюя

В. П. Ковбаса, А. М. Аюбов, Аль-Хазаали Хайдер Раад Надим

Обоснование параметров рабочего органа для бестраншейной укладки оросителя с противофильтрационным экраном: Монография. – Мелитополь, 2018. – 160 с.

Монография подготовлена по материалам теоретических и экспериментальных исследований параметров и режимов работы созданного рабочего органа для бестраншейной укладки оросителя совместно с противофильтрационным экраном. Применение противофильтрационного экрана в системах внутрпочвенного орошения позволяет снизить гравитационный перенос влаги в водонасыщенном слое почвы вокруг оросителя и повысить ее диффузионный перенос. В работе рассмотрены условия создания в почве полостей для беспрепятственной протяжки трубы оросителя и противофильтрационного экрана. Рассмотрены условия устойчивости свода, образованного в почве, в зависимости от ее свойств и параметров рабочего органа. На основе проведенных аналитических исследований, адекватность которых подтверждена результатами экспериментальных исследований, определена энергоемкость выполнения процесса. Все определенные параметры и режимы работы рабочих органов имеют функциональную связь с механическими свойствами почвы.

Работа представляет интерес для магистров, аспирантов, научных сотрудников и инженерно-технических работников, которые занимаются вопросами создания внутрпочвенных оросительных и осушительных систем.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	12
1.1 Характеристика основных водно-физических свойств почв.....	12
1.2 Анализ методов прогнозирования распространения влаги в почве.....	16
1.3 Анализ способов и технологий полива плодовых насаждений.....	23
1.4 Анализ конструкций техники и технических средств и систем для орошения.....	38
1.5 Выводы по разделу	46
РАЗДЕЛ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОРОСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	48
2.1 Описание процесса укладки оросительной трубы с противифльтрационным экраном.....	48
2.2 Анализ процесса образования кротовин для укладки увлажнителя с противифльтрационным экраном.....	49
2.3 Анализ уплотнения почвы конусным наконечником рабочего органа для образования кротовин.....	51
2.4 Анализ уплотнения почвы лемешной частью рабочего органа для образования кротовин.....	77
2.5 Анализ затрат энергии на протягивание увлажнителя с противифльтрационным экраном.....	98
2.6 Анализ процесса сводообразования после прохождения лемешной части рабочего органа для образования кротовин.....	101
2.7 Выводы по разделу.....	107

РАЗДЕЛ 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	109
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	109
3.2 Методика экспериментальных исследований.....	109
3.2.1 Методика определения уплотнений почвы рабочим органом для образования кротовин.....	109
3.2.2 Методика определения механических свойств почвы.....	110
3.2.3 Методика определения тягового сопротивления рабочего органа при проходе без протягивания увлажнителя и с протягиванием его с противодиффузионным экраном.....	114
3.2.4 Методика статистической обработки результатов экспериментальных исследований.....	119
РАЗДЕЛ 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ	
ИССЛЕДОВАНИЙ.....	121
4.1. Результаты экспериментальных исследований тяговых усилий для легкосуглинистой почвы.....	121
4.1.1 Результаты определения механических свойств почвы (грунта).....	121
4.1.2 Результаты определения тяговых усилий для легкосуглинистой почвы.....	124
4.2 Результаты экспериментальных исследований тяговых усилий для среднесуглинистой почвы.....	131
4.2.1 Результаты определения механических свойств почвы (грунта).....	131
4.2.2 Результаты определения тяговых усилий для среднесуглинистой почвы.....	134
РАЗДЕЛ 5. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ	
УКЛАДКИ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ С	139
ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫМ ЭКРАНОМ.....	

5.1 Исходные данные для определения технико-экономической эффективности.....	139
5.2 Сравнительный анализ предлагаемого устройства с базовой технологией.....	140
ВЫВОДЫ	142
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	145

ВВЕДЕНИЕ

Ирак – государство на Ближнем Востоке, за исключением его южной части, расположено в пределах субтропического пояса средиземноморской климатической области. Южная часть страны входит в тропический климатический пояс.

Большая часть Ирака расположена в долине рек Тигр и Евфрат в пределах Месопотамской низменности, северная часть которой представляет собой равнину высотой 200–500 м, южная часть – заболоченная аллювиальная низменность высотой не более 100 м.

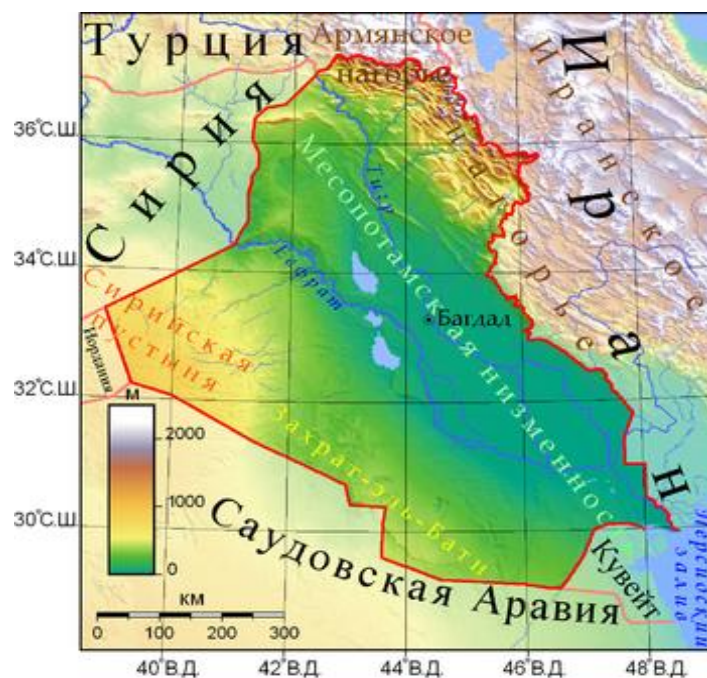


Рис. 0.1 Географическое расположение Ирака [159]

Климат Верхней Месопотамии характеризуется знойным летом и мягкой дождливой зимой, за которую выпадают около 300 мм осадков. Снег бывает редко и быстро тает, средняя температура воздуха в январе колеблется в пределах $+ 10^{\circ} \text{C}$, но в некоторые годы опускается до $- 7^{\circ} \text{C}$, средняя температура июля, превышающая $+ 30^{\circ} \text{C}$, иногда достигает $+ 50^{\circ} \text{C}$.

Нижняя Месопотамия, лежащая в тропическом поясе, имеет теплую зиму и жаркое влажное лето. В Барсе, лежащей всего на 2 м выше уровня моря лето переносится тяжело из-за большой влажности воздуха, что связано с близостью Персидского залива.

Южная Месопотамия лежит в зоне пустынного климата. С середины марта до конца ноября, особенно в июле-августе, там стоит жара, температура воздуха в тени – не ниже + 30°C. Зимой нередко идут ливни, которые превращают долину в сплошную трясику [91].

Чтобы освоить южные месопотамские болота, населению Ирака пришлось построить сложную ирригационную систему, способную обеспечить поля нужным количеством влаги и спасти страну от катастрофических наводнений.

В настоящее время площадь земель с оросительной сетью в Ираке составляет 3,5 млн. га, а площадь перспективного ирригационного фонда в стране достигает примерно 5,5 млн. га. При этом средняя ежегодно орошаемая площадь составляет 1,67 млн. га, которая в наибольшей степени подвержена засолению. Орошаемые земли в основном расположены в центральной и южной частях Ирака [125].

Около 1 млн. га земельных площадей Ирака орошается ирригационными каналами, около 560 тыс. га – насосными установками и др. оборудованием.

Однако в настоящее время на значительных площадях сильное засоление почвогрунтов является препятствием для хозяйственного использования земель и требует проведения дорогостоящих мелиоративных работ.

Фактор бережного расхода поливной воды является решающим в условиях дефицита водных ресурсов Ирака [45].

Почвы Ирака довольно разнообразны. В равнинных районах в долинах Евфрата и Тигра широко распространены наиболее плодородные аллювиально-луговые и луговые почвы, сформированные на речных наносах,

богатые питательными веществами. Правда, на юге и востоке они испытывают сильное засоление. На юго-западе, в междуречье Тигра и Евфрата, особенно к северу от Багдада, и на левобережье Тигра широко распространены сероземы субтропических степей и полупустынь, часто засоленные. На более высоких плато Эль-Джазиры преобладают каштановые почвы сухих и пустынных степей, а в горах северо-востока – горно-каштановые и горно-коричневые почвы. На юге широко распространены бесплодные пески, юго-восточные районы Ирака сильно заболочены, а почвы часто засолены.

Площади, пригодные для земледелия, составляют около 5450 тыс. га (1/8 территории Ирака). До 4000 тыс. га занято пастбищами. Остальные земли выведены из сельскохозяйственного оборота из-за засушливых условий и засоления почв, в том числе обусловленного недостаточным дренажом ранее орошаемых угодий. Главные сельскохозяйственные культуры – пшеница, ячмень и рис. Под них отведена половина пахотных угодий, в основном в лучшем увлажненном северных районах. Также выращивают кукурузу, просо, сахарный тростник и свеклу, масличные культуры, фрукты, табак и хлопок. Большие площади в долинах рек отведены под плантации финиковой пальмы [45].

Промышленное плодоводство в Ираке размещено в основном, в предгорных районах в полосе высот от 800 до 1400 м над уровнем моря.

На сегодня сельское хозяйство Ирака напрямую зависит от наличия воды, использование которой для потребностей сельскохозяйственного производства четко регламентировано.

Орошение – один из наиболее действенных факторов интенсификации как сельского хозяйства в целом, так и плодоводства.

Как известно, основной задачей орошения следует считать получение высоких урожаев при минимальных затратах воды на создание единицы продукции.

Орошение является важным агротехническим приемом, способствующим лучшему росту, повышению урожайности и экономической эффективности плодово-ягодных насаждений и виноградников. Но только поставленное на научной основе орошение, в сочетании с другими приемами может оказать наиболее положительное действие.

Существующие оросительные системы, наряду с общим положительным эффектом, имеют тенденцию негативных воздействий на окружающую природную среду, заключающуюся в нерациональном использовании водных ресурсов, низком КПД, повышении уровня грунтовых вод, вторичном засолении почв и т.д. Кроме того, данные системы энергоемки и дорого обходятся земледельческим хозяйствам. В условиях возрастающего дефицита водных и энергетических ресурсов, возникает необходимость в разработке новых локальных способов орошения, обеспечивающих равномерность увлажнения почвы, получение высоких урожаев фруктов, при значительном снижении энергозатрат, эксплуатационных расходов и оросительной воды.

Поэтому создание высокопродуктивных промышленных садов и внедрение в производство прогрессивных способов их орошения на основе разработки рациональных конструктивных параметров и режимов работы оросительных систем приобретает особую актуальность в условиях природно-климатических зон Ирака.

Положительно решить данный вопрос можно на основе внедрения в производство новых прогрессивных способов полива, и, прежде всего, с локальным характером увлажнения почвы (капельное и внутрипочвенное орошение). Большое значение для дальнейшего развития орошаемого садоводства имеет автоматизация полива, которая невозможна без управления водным режимом почвы. В отличие от поверхностных способов полива внутрипочвенное орошение недостаточно изучено. Вопросы теоретического обоснования этого способа полива, подтвержденного

экспериментальными исследованиями, требуют дальнейшего серьезного изучения.

Вследствие больших капитальных затрат на строительство систем внутрипочвенного орошения (СВПО), этот способ полива наиболее целесообразно использовать при выращивании высокорентабельных сельскохозяйственных культур, к которым относятся и плодовые культуры. Однако, строительство СВПО, предшествующее посадке плодовых деревьев, приводит к тому, что в течение ряда лет, до начала периода плодоношения, произведенные капиталовложения не приносят прибыли и не окупаются, т.е. являются «замороженными». В современных рыночных условиях это препятствует широкому внедрению данного способа полива в плодоводстве.

В связи с этим появилась необходимость в проведении исследований по обоснованию параметров и режимов работы систем полива действующих плодовых насаждений, в частности внутрипочвенного орошения садов.

Целью работы является разработка и оптимизация параметров и режимов работы устройства для прокладки оросителей с противодиффузионным экраном для орошения плодовых насаждений.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих *задач*:

- выполнить анализ современного состояния и перспектив развития существующих способов и технических средств, параметров и режимов их работы для орошения сельскохозяйственных культур;
- изучить закономерности передвижения и распределения влаги в активном слое почвы при внутрипочвенном орошении;
- выполнить анализ взаимодействия рабочего органа для образования полости в почве (грунте) для бестраншейной укладки оросителя с противодиффузионным экраном;
- проанализировать уплотнение стенок полости при взаимодействии с почвой рабочего органа;

– выполнить анализ энергоемкости процесса одновременного образования полости в почве (грунте) и протягивания трубы оросителя с противодиффузионным экраном;

– выполнить анализ устойчивости свода полости, образованной рабочим органом в почве (грунте);

– экспериментально подтвердить адекватность полученных теоретических зависимостей.

В основу работы положено обобщение результатов научных исследований авторов, проведенных в 2014-2017 годах.

Авторам приятно воспользоваться возможностью искренне поблагодарить рецензентов за полезные замечания и предложения.

Работа будет полезной сотрудникам научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций и производственных предприятий, аспирантам, докторантам, преподавателям и студентам ВУЗов, всем, кто занимается решением задач, связанных с внутрпочвенным орошением.

РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1 Характеристика основных водно-физических свойств почв

Одним из условий получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур является создание оптимальных параметров и режимов влажности в почвенном профиле.

Закономерности формирования режима влажности почвы в значительной мере определяются ее гидрофизическими свойствами, которые, в свою очередь, зависят от гранулометрического состава, плотности, температуры, порозности, содержания органического вещества. Это предопределяет, с одной стороны, неоднородность почв по гидрофизическим параметрам, а с другой – большие практические возможности для моделирования и прогнозирования гидромелиоративных эффектов, различных агромероприятий и обоснования наиболее рациональных мелиоративных технологий.

Водными (водно-физическими, гидрофизическими) свойствами называют совокупность свойств почвы, которые определяют поведение почвенной воды в ее толще. Наиболее важными водными свойствами являются: водоудерживающая способность почвы, ее влагоемкость, водоподъемная способность, потенциал почвенной влаги, водопроницаемость.

Водоудерживающая способность – способность почвы удерживать содержащуюся в ней воду от стекания под влиянием силы тяжести. Количественной характеристикой водоудерживающей способности почвы является ее влагоемкость. Влагоемкость почвы – способность поглощать и удерживать определенное количество воды. В зависимости от сил, удерживающих воду в почве, и условий ее удержания выделяют следующие виды влагоемкости, которые соответствуют определенным формам воды: максимальную адсорбционную, максимальную молекулярную, капиллярную, наименьшую, или полевую, и полную.

Для расчёта поливных норм используют *наименьшую влагоемкость (НВ)*, которая зависит главным образом от гранулометрического состава почв, от их структурности и плотности (сложения). В почвах тяжелых по гранулометрическому составу, хорошо структурных НВ почвы составляет 30-35 %, в почвах песчаных она не превышает 10-15 %. Наименьшая влагоемкость почв является очень важной гидрологической характеристикой почвы. С ней связано понятие о дефиците влаги в почве, по НВ рассчитываются поливные нормы.

Дефицит влаги в почве представляет собой величину, равную разности между наименьшей влагоемкостью и фактической влажностью почвы. Оптимальной влажностью считается влажность почвы, составляющая 70 – 100 % наименьшей влагоемкости.

Водопроницаемость почв – способность почв и грунтов впитывать и пропускать через себя воду, поступающую с поверхности. В процессе поступления воды в почву и дальнейшего передвижения ее можно выделить 2 этапа: 1) поглощение воды почвой и прохождение ее от слоя к слою в ненасыщенной водой почве, 2) фильтрацию воды сквозь толщу насыщенную водой почвы.

При этом первый этап представляет собой впитывание почвы и характеризуется *коэффициентом впитывания*. Вторым этапом – это собственно фильтрация. Интенсивность прохождения воды в почвенно-грунтовой толще, насыщенной водой, характеризуется *коэффициентом фильтрации*. В природных условиях четко выделить отдельные этапы водопроницаемости практически невозможно. Значительно чаще при этом идет впитывание воды почвой, фильтрация же имеет место только в случае выпадения большого количества осадков, при орошении большими нормами и при снеготаянии. Границей между впитыванием почв и фильтрацией считают момент установления постоянной скорости фильтрации.

Водопроницаемость почв находится в тесной зависимости от их гранулометрического состава и химических свойств почв, их структурного

состояния, плотности, порозности, влажности и длительности увлажнения. В почвах тяжелого гранулометрического состава она всегда (при прочих равных условиях) меньше, чем в легких. Сильно снижает водопроницаемость почв присутствие набухающих коллоидов, особенно насыщенных Na^+ или Mg^{2+} , поскольку при увлажнении такие почвы быстро набухают и становятся практически водонепроницаемыми. Почвы структурные, рыхлые характеризуются большими коэффициентами впитывания и фильтрации.

Водопроницаемость почв измеряется объемом воды, который проходит через единицу площади поперечного сечения в единицу времени (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Оценка водопроницаемости почв по Н. А. Качинскому [56]

<i>Водопроницаемость (в Па) в 1-й час впитывания при напоре 5 см и температуре воды 10° С</i>	<i>Оценка</i>
свыше 1000	Провальная
1000-500	Излишне высокая
500-100, выравненная по всей площади	Наилучшая
100-70	Хорошая
70-30	Удовлетворительная
<30	Неудовлетворительная

В ненасыщенных водой почвах для количественной характеристики водопроницаемости почв пользуются *коэффициентом водопроводимости, или влагопроводности*. Он определяется как коэффициент пропорциональности между скоростью потока воды и градиентом сил, вызывающих передвижение воды (давление, гидравлический напор и т. п.). Коэффициент влагопроводности зависит от влажности почв: увеличивается с увеличением ее влажности и достигает максимума во влагонасыщенной почве. В этом случае его и называют *коэффициентом фильтрации*.

Водоподъемная способность почв – свойство почвы вызывать восходящее передвижение содержащейся в ней воды за счет капиллярных сил. Высота подъема воды в почвах и скорость ее передвижения определяются в основном гранулометрическим и структурным составом почв, их порозностью (табл. 1.2). Чем почвы тяжелее и менее структурны, тем больше потенциальная высота подъема воды, а скорость подъема ее меньше.

Таблица 1.2

Водоподъемная способность грунтов и почв в зависимости от гранулометрического состава [109]

<i>Гранулометрический состав</i>	<i>Водоподъемная способность, м</i>
Крупный песок	0,5
Средний песок	0,5-0,8
Супесь	1,0-1,5
Пылеватая супесь	1,5-2,0
Суглинок средний	2,5-3,0
Суглинок тяжелый	3,0-3,5
Глина тяжелая	4,0-6,0
Лессы	4,0-5,0

В песчаных почвах высота капиллярного подъема снижается, но скорость движения воды велика.

В почве, насыщенной влагой и не содержащей солей, давление почвенной влаги равно нулю. При снижении влажности почвы оно приобретает все большие по абсолютной величине отрицательные значения. По мере иссушения у почвы появляется способность при соприкосновении с водой поглощать ее. Такая способность почв получила название сосущей силы почвы. Впервые она была установлена В. Г. Корневым [67]. Величина,

характеризующая эту силу, получила название всасывающего давления почвы.

При внутрпочвенном орошении, где вода вводится снизу, по заложенным в земле трубам, увлажнение активного слоя почвы производится, в основном, капиллярным и пленочным путем, т.е. используется всасывающая способность почвы. Последняя зависит от капиллярных свойств – чем больше капиллярность почвы, чем меньше диаметр ее частиц, тем больше всасывающая способность почвы при прочих равных условиях. Однако, кроме этих факторов, всасывающая способность почвы в определенный момент времени значительно зависит от влажности почвы. Чем больше влажность почвы, тем меньше, при прочих одинаковых условиях, ее всасывающая способность и обратно.

Изменение всасывающей способности почвы в зависимости от влажности происходит по некоторой кривой, по мнению Н. А. Муромцева [92] в обычных координатах зависимость носит гиперболический характер, а в полулогарифмическом масштабе, как отмечает И. И. Судницын [133] – линейный. От сухого состояния, приблизительно, до двойной гигроскопичности и затем от капиллярной влажности до полного насыщения всасывающая способность почвы с увеличением влажности уменьшается слабее, чем на промежутке между двойной гигроскопичностью и капиллярной влажностью данной почвы.

1.2 Анализ методов прогнозирования распространения влаги в почве

В процессе полива между почвой и водой возникает целый ряд физико-химических и физических явлений, которые могут быть представлены как результат действия сил, возникающих на границе раздела между твердыми частицами почвы и влагой. Вопросу взаимодействия твердой части почвы и воды, а также передвижению влаги в почвогрунтах посвящено значительное количество экспериментальных и теоретических исследований. Важные

результаты были получены С. Ф. Аверьяновым [2], С. И. Долговым [43], А. В. Лыковым [83], А. И. Будаговским [27], И. И. Судницыным [133], А. Ф. Лебедевым [80, 81], А. А. Роде [118, 119], Э. Букингом [150], Н. Эдлефсеном [152], Дж. Филипом [156] и другими учеными.

Наиболее совершенной классификацией передвижения жидкой влаги в почве является классификация, предложенная А. А. Роде [119]. Он различает четыре "механизма" ее передвижения: гравитационный, гравитационно-капиллярный, пленочно-капиллярный и пленочный.

Передвижение жидкой влаги в почве зависит от влажности последней. Обязательным условием передвижения в почве жидкой влаги из одной точки почвенной толщи в другую является наличие разности сил, под действием которых находится влага в этих точках.

Наиболее перспективным и теоретически обоснованным подходом к изучению поведения воды в почве считается термодинамический подход, поскольку он не только позволяет описывать состояние и передвижение воды в почве в данный момент времени в наиболее обобщенном виде на базе фундаментальной физической теории, рассматривая весь водообмен природных экосистем в единых терминах, но и допускает количественный прогноз водообменных процессов, что особенно важно для суждений о водообеспеченности и водопотреблении растений. На основе этого подхода возможно автоматизированное управление водным режимом почв в условиях искусственного увлажнения (орошения) или осушения (дренажа). В разработку этого подхода особенно большой вклад внесли такие ученые, как Л. А. Ричардс [158], И. И. Судницын [133], А. М. Глобус [35], А. Д. Воронин [32]. Существо термодинамического подхода сводится к использованию понятий полного и частных термодинамических потенциалов почвенной воды, поддающихся инструментальному измерению, т. е. количественной энергетической оценке сил взаимодействия между водой и вмещающей ее твердой фазой почвы.

Поскольку вода в почве находится под одновременным сложным воздействием нескольких силовых полей – адсорбционных, капиллярных, осмотических, гравитационных, – для характеристики их суммарного действия и оценки энергетического состояния воды в почве введено понятие термодинамического, или полного, потенциала почвенной воды.

Полный потенциал почвенной воды (ψ_t) – это количество работы, Дж•кг⁻¹, которую необходимо затратить, чтобы перенести единицу свободной чистой воды обратимо и изотермически из стандартного состояния S_0 в то состояние S_n , в котором она находится в рассматриваемой точке почвы. Иными словами, эта величина выражает способность воды в почве производить большую или меньшую работу по сравнению с чистой свободной водой. За стандартное состояние S_0 при этом принимается резервуар с чистой (без солей, т. е. с осмотическим давлением $\pi = 0$) свободной (т. е. не подверженной влиянию адсорбционных и капиллярных сил) водой при температуре T_0 , высоте h_0 и давлении P_0 . Потенциал почвенной воды – величина отрицательная, поскольку необходима работа (положительного знака) по его преодолению. Вместо понятия «потенциал» в почвоведении принято использовать понятие «давление почвенной воды», которое измеряется в паскалях [Па=кг/с²•м].

Полный, или термодинамический, потенциал почвенной воды равен сумме частных потенциалов, связанных с разными силовыми полями:

$$\begin{aligned} \psi_t &= \varphi_a + \varphi_k + \varphi_0 + \varphi_g = \varphi_p + \varphi_0 + \varphi_g = \\ &= g_0 S^z dz + V_{H_2O} \left[{}_0 S^p dP + {}_0 S^\pi dP \right], \end{aligned} \quad (1.1)$$

где φ_a – адсорбционный потенциал; φ_k – капиллярный потенциал; φ_0 – осмотический потенциал; φ_g – гравитационный потенциал; φ_p – потенциал тензометрического давления; z – вертикальное расстояние; g – сила

гравитации на единицу массы воды; V_{H_2O} – парциальный удельный объем воды в почвенном растворе; P – давление воды; π – осмотическое давление.

Относительный вклад частных термодинамических потенциалов почвенной воды в ее полный потенциал существенно меняется с изменением влажности почвы: чем суше почва, тем больше роль адсорбционных и осмотических сил; чем она влажнее, тем больше относительная роль капиллярных и затем гравитационных явлений и тем меньше значение давления, показанного тензиометром [109].

Невыровненность потенциалов почвенной воды в разных точках является непосредственной причиной движения воды в почвах: вода перемещается в сторону наиболее низкого потенциала, в общем случае из более влажных участков в более сухие. Однако вследствие наличия сопротивления среды движению воды движущей силой перемещения почвенной воды служит не разность потенциалов (давлений) воды между двумя точками ΔP , а градиент $\Delta P / \Delta l$ вдоль направления движения, что было установлено еще в середине прошлого века в известном законе Дарси для плотности установившегося водного потока в пористой среде [109].

Существует определенная связь почвенно-гидрологических констант с давлением почвенной воды. Например, наименьшей влагоемкости почвы соответствует давление от -10^4 до $-3 \cdot 10^4$ Па, а влажности завядания от $-6 \cdot 10^5$ до $-2,5 \cdot 10^6$ Па. С изменениями давления почвенной воды в зависимости от влажности меняется и коэффициент влагопроводности почв K в уравнении потока воды в почве ($i = -K \Delta P / \Delta l$); при изменении влажности почвы от наименьшей влагоемкости до влажности завядания K уменьшается на два порядка (сухая почва обладает худшей влагопроводностью, чем влажная).

Установлены эмпирические зависимости водопотребления растений от давления воды в почве, но они весьма сложные и подвержены воздействию множества самых разнообразных факторов, действующих в системе почва - растение - атмосфера. Однако моделирование процессов водопотребления с

использованием термодинамической концепции поведения воды в почве представляется весьма перспективным и может быть использовано для управления водным режимом почв.

При моделировании водного режима почвогрунтов различной степени насыщенности к настоящему времени, по мнению Ю. Я. Гольцова [98], не предложено более адекватной и простой модели изотермического движения воды, чем *одномерное* уравнение [110, 116]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(W) \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q(z, t) \quad , \quad (1.2)$$

в основе которого лежит уравнение Ричардса [157]. Здесь: $W(\psi)$ – влажность грунта, дол. ед; $H = -\psi - z$ – гидравлический напор, м; $\psi(z)$ – потенциал давления влаги, м ; $K(W)$ – коэффициент влагопроводности, м/сут; $Q(z, t)$ – функция источников-стоков, л / сут; z – вертикальная координата с положительным направлением вниз, м; t – время, сут.

Простота уравнения (1.2) и его преимущество, позволяющее совместно рассматривать процессы движения воды в насыщенной и ненасыщенной зонах почвы и грунта, делают его привлекательным при моделировании. Сохранение одномерности уравнения Ричардса при рассмотрении движения воды в разнообразных природных условиях и построении максимально простых расчетных схем расширяет его применение.

Одномерное движение воды в почвогрунтах в направлении $s(t)$, как функции времени, [116] и составляющем угол α с осью z , позволяет (1.2) записать в виде

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left[K(W) \frac{\partial H}{\partial s} \right] + Q(s, t), \quad (1.3)$$

где выражение для гидравлического напора принимает вид

$$H = -\psi - s(t) \cos \alpha \quad (1.4)$$

Используя законы Дарси и сохранения вещества или же воспользовавшись [113], довольно легко получить одномерное уравнение

$$F(s) \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left[F(s) K(W) \frac{\partial H}{\partial s} \right] + Q(s, t) \quad (1.5)$$

движения воды в полосе почвогрунта (вертикальной плоскости) переменной ширины $F(s)$ зоны неполного и полного насыщения.

Все модели влагопроводности почвы, по мнению А. Д. Ахмедова [14], условно можно разделить на теоретические, полуэмпирические и эмпирические.

Теоретические модели представляют собой различные зависимости, основанные на законах движения жидкости в капиллярно-пористых телах. К этой группе моделей относятся зависимости, позволяющие определить влагопроводность по ранее рассчитанной основной гидрофизической характеристике почвы.

В отличие теоретических моделей, полуэмпирические основаны на теоретических предпосылках и представляют собой простые эмпирические зависимости, аппроксимирующие более сложные теоретические уравнения.

Наиболее распространенной полуэмпирической моделью является формула С. Ф. Аверьянова [2], описывающая зависимость коэффициента влагопроводности от степени насыщения почвы влагой степенной функцией

$$K(W) = K_{\phi} \left(\frac{W - W^*}{m - W^*} \right)^n, \quad (1.6)$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации; m – пористость; W^* – связанная влага, то есть влажность, при которой начинается интенсивное движение воды в жидкой фазе.

Предложенная зависимость (1.6) получила дальнейшее развитие в ряде работ [29, 30]. Причем модификации этой модели касались гидрологических констант, входящих в зависимость, и показателя степени. Область применения данной модели была расширена в пределах от максимальной гигроскопичности до полного водонасыщения путем увеличения показателя степени до $n = 5$, при этом зависимость принимает вид

$$K(W) = K_{\phi} \left(\frac{W - W_m}{m - W_m} \right)^5, \quad (1.7)$$

W_m – максимальная гигроскопичность.

Последняя группа моделей – это эмпирические модели, которые представляют собой простые эмпирические формулы, аппроксимирующие экспериментальные кривые влагопроводности почвы. Примером эмпирических моделей может служить регрессионная зависимость коэффициента влагопроводности от гранулометрического состава почвы.

Зависимость напора почвенной влаги от глубины и с течением времени описывается уравнением Голованова [28]:

$$C_{\omega} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\epsilon} \frac{\partial H}{\partial z} \right) - E(\omega, z, t), \quad (1.8)$$

где C_{ω} – коэффициент влагоемкости;

H – напор почвенной влаги; изменяется – увеличивается со временем, уменьшается по вертикальной координате;

k_{ϵ} – коэффициент влагопроводности почвы, равен коэффициенту пропорциональности между скоростью потока воды и градиентом сил;

$$k_{\epsilon} = k_{\phi} ((\omega - \omega_m) / (p - \omega_m))^5.$$

где k_{ϕ} – коэффициент фильтрации рассматриваемого слоя;

ω – объемная влажность почвы;

ω_m – максимальная гигроскопичность почвы;

p – объемная пористость почвы;

Анализ рассмотренных результатов позволяет сделать вывод о том, что оросители, при условии использования противифльтрационного экрана, могут располагаться на расстоянии 3-4 м. А учитывая существенную засоленность почв Ирака, это расстояние может быть и больше, поскольку

засоленные почвы обладают существенно большим потенциалом влаги (зависимость (1.1)).

1.3 Анализ способов и технологий полива плодовых насаждений

В системе агротехнологических приемов при выращивании сельскохозяйственных культур одной из важнейших операций является полив. На сегодняшний день существует большое многообразие видов орошения и поливных устройств для них.

Исследованию процесса орошения посвящены работы Е. В. Акутневой, И. П. Айдарова, М. В. Мазепы, А. Д. Ахмедова, М. Н. Багрова, В. И. Барашкова, В. Д. Бердышева, Е. П. Борового, Е. А. Ветренко, Г. И. Ворониной, М. С. Григорова, В. Р. Ридигера, Д. Б. Райхмана, Б. Б. Шумакова, Ю. Л. Маркова, А. А. Черкасова, А. Н. Костякова, М. И. Ромащенко [3, 4, 84, 13, 16-18, 24-26, 29, 33, 37-39, 117, 114, 149, 85, 143, 69, 123] и другие.

Показателями качества полива является выполнение нормы полива, дисперсность капли, интенсивность полива, равномерность полива.

Поверхностный полив по характеру увлажнения почвы и условиям механизации проводится напуском по полосам, площадкам или чекам с затоплением всей поверхности участка (травы, зерновые) или с подачей воды по бороздам (пропашные культуры).

Полив по бороздам проводится преимущественно при возделывании пропашных культур, при ленточном способе посева полевых, овощных культур, а также плодовых и ягодных насаждений. Борозды бывают мелкие – 8-12 см, средние – 12-16см, глубокие – 22см и очень глубокие – более 22см. Расстояния между бороздами в зависимости от глубины и механического состава почвы могут быть 0,6-0,7; 0,7-0,9 и 0,9-1,1 м. Длина поливных борозд зависит от водопроницаемости почвы, уклона поливного участка и может быть равна 100-300 м.

Недостатки этого способа полива: большая трудоемкость, низкая производительность труда поливальщика, невозможность полива малыми нормами. Кроме того, если засоленные горизонты располагаются неглубоко,

то возможно засоление межбороздных полос в результате испарения влаги. [85].

Полив по полосам применяется для влагозарядки, полива культур сплошного, реже широкорядного, способа посева и садов.

Этот способ полива применяется на полях со спокойным рельефом, с однородным продольным склоном от $0,002^\circ$ до $0,015^\circ$. Поперечный склон не должен превышать $0,005^\circ$ на узких и $0,003^\circ$ на широких полосах. Ширина полос колеблется от 3,6 до 20-30 м, длина – от 50 до 400 м и более. Длинные полосы нарезаются на хорошо спланированных полях с продольным склоном $0,001^\circ$ - $0,003^\circ$ и незначительной водопроницаемостью почвы.

Недостатком этого способа полива является уплотнение почвы на всей площади и образование поверхностной почвенной корки. При запоздании с поливом могут образовываться трещины в почве, что приводит к разрыву корневой системы растений.

Полив затоплением проводится на участках (чеках), ограниченных земляными валиками. Он требует больших первоначальных затрат на сооружение чеков, особенно тщательную планировку и, в ряде случаев, на устройство дренажной сети [149].

Недостатки этого способа полива следующие. Прежде всего, расходуется большое количество воды. Вследствие длительного затопления чеков почва разобщается с приземным слоем воздуха, на длительное время прекращается газообмен между почвенным и атмосферным воздухом, замедляется аэробный процесс и ухудшаются условия питания растений [114].

Агротехнические требования к поверхностному поливу:

- время начала орошения и нормы полива устанавливаются непосредственно в хозяйствах в зависимости от содержания влаги в почве;
- при подаче поливной нормы должна быть обеспечена требуемая глубина увлажнения почвы, соответствующая глубине залегания основной массы корней растений;

- распределение влаги по орошаемой площади должно быть равномерным: при скорости ветра до 5 м/с коэффициент равномерности – не менее 0,7;
- содержание взвешенных частиц – до 5 г/л и минеральных солей – до 6 г/л;
- сток воды с орошаемой площади не допускается;
- неравномерность подачи воды в борозды не должна превышать ± 10 % от заданной нормы полива при одновременной работе всех трубопроводов;
- повреждения культурных растений не должны превышать 0,2 %;
- не допускается размыв почвы в местах соединения и водовыпусков поливного трубопровода;
- размеры орошаемых участков – площадь (с различной конфигурацией) 5-30 га; длина поливных борозд 100-600 м, глубина 13-16 см [69].

Исходя из вышеизложенного, можно выделить основные преимущества и недостатки способа **поверхностного** орошения.

Преимущества: низкие капиталовложения; низкие затраты на энергию; низкие эксплуатационные затраты; возможность полива при ветре; подходит для полива растений, чувствительных к заболеваниям листьев.

Недостатки: большие потери воды; возможность распространения заболеваний растений; данный способ не приемлем на неблагоприятных уклонах; не приемлем как увлажняющий полив; большой объем планировочных работ при сложном микрорельефе; нарушение структуры почвы и потребность в дополнительном рыхлении междурядий; неравномерность увлажнения почвы вдоль поливных борозд и полос; высокая вероятность поднятия уровня грунтовых вод с засолением или заболачиванием орошаемых участков [143].

Дождевание – это наиболее распространенный способ полива. Применяется в зонах неустойчивого увлажнения, при орошении участков со

сложным рельефом и водопроницаемыми почвами с близким залеганием грунтовых вод. Искусственное дождевание, подобно естественному дождю небольшой интенсивности, но достаточной длительности, создает наилучшие условия для роста растений; уменьшается испарение вследствие высокой теплоемкости воды; температура околосемного слоя воздуха снижается в жаркое время суток и повышается в прохладные ночные часы [149].

Дождевание наиболее широко применяют на безуклонных и малоуклонных участках с почвами средней и высокой водопроницаемости для полива овощных, технических, зерновых культур, садов, питомников, лугов в зоне недостаточного увлажнения, где орошение только дополняет естественные осадки в засушливые периоды [114].

Полив дождеванием широко применяют на виноградниках многих стран мира. Он обеспечивает равномерное увлажнение почвы по площади, повышает производительность труда на поливе и уменьшает затраты труда. В Украине дождевание перспективное при орошении виноградников на склонах и на песчаных массивах Левобережного Нижнеднепровья. Для полива виноградников дождеванием используют стационарные оросительные системы, шлейфы ДШ-25/300, дождевальную машину ДФ-120 "Днепр", переоборудованный ДДА-100МА. При организации территории виноградника для полива с помощью ДДА-100МА через каждые 100 м оставляют дорогу шириной 6 м для нарезания временного оросителя и прохода агрегата, Для более глубокого увлажнения почвы перед поливом междурядья брабатывают чизельным плугом на глубину 25-30 см. Лучшие результаты получают, когда ДДА-100МА проходит по орошаемому участку шесть-восемь раз в зависимости от нормы полива. При норме полива 500 м³/га производительность труда составляет 0,9 га/ч [45, 45 а].

Орошение дождеванием незаменимо на участках со сложным рельефом, с близким залеганием грунтовых вод, со слабозасоленными и просадочными грунтами.

Дождевание имеет следующие преимущества по сравнению с поверхностным орошением: полная механизация работ; поливная норма регулируется более точно и в широких пределах (от 30...50 до 300...800 м³/га и более), что позволяет создавать водно-воздушный режим почвы, близкий к оптимальному, и регулировать глубину промачивания почвы; можно осуществлять полив на участках с большими уклонами и со сложным микрорельефом; забор воды возможен из каналов, идущих в выемке, а также из закрытой сети; исключаются работы по поделке поливных борозд, валиков, выводных борозд; улучшаются условия механизации посева, посадки, обработки и уборки сельскохозяйственных культур; улучшаются микроклимат и развитие корневой системы; активизируются процессы ассимиляции; повышаются плодородие почвы и урожай сельскохозяйственных культур; запланированный урожай можно получить при меньших (на 15...30 %) затратах воды, чем при поверхностном орошении; кроме того, одновременно с орошением можно вносить в почву и удобрения [132].

Агротехнические требования к орошению методом дождевания:

- время начала орошения и нормы полива устанавливаются непосредственно в хозяйствах в зависимости от содержания влаги в почве;
- не допускается повреждение растений при орошении;
- при подаче поливной нормы должна быть обеспечена требуемая глубина увлажнения почвы, соответствующая глубине залегания основной массы корней растений;
- распределение влаги по орошаемой площади должно быть равномерным: при скорости ветра до 5 м/с коэффициент равномерности – не менее 0,7;
- сток воды с орошаемой площади не допускается;
- содержание взвешенных частиц — до 5 г/л [114];
- при дождевании размер капель не должен превышать 1...2 мм. Этот показатель искусственного дождя влияет на допустимую интенсивность,

потери воды на испарение, затраты мощности, уплотнение почвы, допустимую поливную норму до начала образования стока и т.п. Так, при диаметре капель 1,0-1,5 мм и интенсивности 0,5 мм/мин величина допустимой поливной нормы – 130-700 м³/га, а при диаметре капель более 2,0 мм – лишь 50-190 м³/га. Увеличение интенсивности до 1,0 мм/мин уменьшает допустимую поливную норму до 30-120 м³/га (диаметр капель более 2,0 мм) [69];

– интенсивность дождевания, т. е. толщина слоя влаги, подаваемой на почву в единицу времени, на тяжелых почвах не должна превышать 0,2 мм/мин, на средних почвах – 0,2...0,3 мм/мин и на легких почвах – 0,5...0,8 мм/мин. При таких условиях капли не повреждают растения, вода впитывается в почву, а почвенные комки не разрушаются [143];

Исходя из вышесказанного, можно выделить основные преимущества и недостатки способа орошения методом дождевания.

Преимущества: возможен полив на полях со сложной топографией; подходит для полива большинства культур; высокая эффективность полива; широкий диапазон выбора размера капли дождевателей облегчает проектирование и регулировку интенсивности полива; дает возможность точного измерения расхода воды на участке; увеличивает коэффициент земельного использования; высокая мобильность систем орошения; удобство внесения удобрений с поливной водой; возможность достижения одинаковой интенсивности полива на орошаемом участке.

Недостатки: высокие начальные капиталовложения; дополнительные затраты на энергию, потребляемую на создание нужных напоров в оросительных системах (40... 100 кВт/ч на 1 полив при норме 300 м³/га); неравномерность распределения воды в поле при ветре; проблемы уплотнения верхнего слоя почвы, связанного с образованием корки на поверхности почвы, и повышенный сток; усложняет проведение сельхозработ на орошаемом участке; большая удельная металлоемкость

(100—300 кг/га); необходимость постоянного обслуживания дождевальных насадок и дефлекторов [143].

Капельное орошение – термин, объединяющий новые технологии и технические средства полива сельскохозяйственных культур. Процесс капельного орошения обеспечивается при относительно небольшом давлении с некоторыми интервалами и с малой интенсивностью водоподачи или подачи слабоконцентрированных растворов питательных веществ к корням растений над поверхностью почвы или непосредственно в почву.

Капельное орошение характеризуется рядом технологических особенностей, главными из которых есть:

- локальный характер увлажнения почв только в зоне развития основной массы корневой системы;
- использование для настройки водораспределительной системы капельного орошения инертных относительно окружающей среды материалов, в первую очередь полимерных [123].

При капельном орошении появляется возможность проводить обработку почвы, работы по борьбе с вредителями и болезнями растений непосредственно во время полива. Низкая удельная интенсивность водоподачи, а также локальный (очаговый) характер увлажнения почвы делает капельный способ полива пригодным для проведения орошения на невыровненных участках и на крутых склонах, что важно для зон с низким уровнем водообеспечения и пересеченным рельефом местности [124].

Преимущества капельного орошения: корневой метод полива; потери влаги за счет испарения меньше, чем при дождевании или поверхностном орошении; ветер не влияет на распределение влаги; не требует тщательной планировки поливного участка, предотвращает поверхностный сток даже в сложных топографических условиях; дает возможность проведения сельхозработ во время орошения; возможность полива малыми поливными нормами и с короткими межполивными периодами; не требует создания высокого давления в напорных магистральных; при использовании бака -

накопителя поливная вода достигает оптимальной температуры, что помогает избежать температурного шока у растений.

Недостатки капельного орошения: не приемлемо для вспомогательных технических поливов; частая засоряемость капельниц-водовыпусков отложениями солей и планктоном, образующимися в течение межполивного интервала в трубопроводах-увлажнителях; высокая стоимость строительства систем капельного орошения, а также высокие эксплуатационные затраты; неравномерность распределения по орошаемому участку оросительной воды; при недостаточных осадках нужна дополнительная поливная норма, чаще всего подаваемая дождеванием.

Внутрипочвенное (подпочвенное) орошение. Систему подпочвенного орошения классифицируют по конструкции увлажнителей и устройству проводящих элементов сети, характеру работы сети в процессе полива. Основной конструктивный элемент, определяющий особенности системы подпочвенного орошения, – увлажнители, конструкция и материал которых могут влиять на характер и распределение воды и увлажнения почвы [132].

Для устройства труб - увлажнителей применяют гончарные и керамические трубы, а в последнее время и полимерные. Внутрипочвенное орошение основано на действии всасывающей силы почвы, поэтому его можно применять на почвах с хорошими капиллярными свойствами и водонепроницаемой подпочвой и нельзя – на песчаных, супесчаных, галечниковых, присадочных и засоленных [97].

По способу подачи воды внутрипочвенные системы делят на вакуумные или адсорбционные с капиллярным увлажнением (вода поступает к растениям благодаря всасывающим силам почвы); низконапорные с капиллярно - гравитационным увлажнением (вода распределяется по сети самотеком) и напорные с гравитационно - капиллярным увлажнением (вода подается в почву при создании искусственного напора) [114].

При данном виде внутрпочвенного орошения вода в трубах находится под некоторым напором, а характер ее поступления в почву будет зависеть от конструкции увлажнителей. В том случае, если в трубах имеет место сосредоточенный выход воды (отверстия, щели и т.п.), то вода, поступившая в почву, передвигается в ней главным образом под действием силы тяжести и гидростатического давления. Если выход воды в почву происходит через пористую поверхность труб, то ее дальнейшее передвижение в почве будет носить преимущественно капиллярный характер.

Преимущества внутрпочвенного орошения: возможность поддерживать влажность активного слоя почвы на уровне капиллярной влагоемкости; структура пахотного горизонта не разрушается поливами, не образуется корка, меньше сорняков; можно использовать сточные воды и тепловые отходы ТЭС; испарение с поверхности почвы меньше и запасы воды в почве сохраняются дольше, чем при поливе дождеванием; нет препятствий для механизации всех сельскохозяйственных работ, так как отсутствуют временная оросительная и поливная сеть; может использоваться для внесения жидких минеральных удобрений и аэрирования [114].

Недостатки: высокая стоимость строительства системы; невозможность использования на легких, просадочных и засоленных почвах; слабое увлажнение верхнего слоя почвы (0...0,1 м), что ухудшает условия всходов и приживаемости рассады овощных и других культур; необходимость осветления оросительной воды во избежание заиливания оросительных труб; затруднен ремонт и осмотр поливных линий; водовыпуски могут подвергаться блокировке корнями растений; необходима частая промывка системы; не обеспечивается равенство расходов всех микроводовыпусков во времени [69, 114].

Аэрозольный (мелкодисперсный) полив применяют в основном при выращивании посадочного материала под пленкой и в теплицах. Этот способ основан на покрытии растений туманом, когда капли воды, осаждаясь на листьях растений, не скатываются, а находятся на них до полного испарения.

Аэрозольное орошение предназначено для регулирования микроклимата над полем. Целесообразность применения мелкодисперсного (аэрозольного) орошения зависит от природно-климатических (климат, рельеф, обеспеченность водой, качество оросительной воды) и хозяйственно-экономических условий (состав и особенности сельскохозяйственных культур, их физиологические потребности, условия возделывания, ресурсообеспеченность).

Разрабатываются технологии их применения для регенерации корневой системы озимых культур после неблагоприятных условий зимовки [81].

Величина капель воды достигает 200-300 микрометров, которые не скатываются с листьев, а остаются на них до полного испарения. Такие капли воды образуются при дроблении струи воды туманообразующими установками. В течение дня посева, посадки увлажняют до 10 раз, расходуя за один полив 100-200 л/га. Системы аэрозольного орошения могут быть передвижными, полустационарными и стационарными [114].

Преимущества аэрозольного орошения: экономный расход воды; поддержание почвы у корневой системы во влажном состоянии, а в междурядьях – в полусухом, что облегчает обработку насаждений; туман, образованный над поверхностью почвы при аэрозольном орошении, способствует защите растений от заморозков.

Недостатки: повышенные требования к очистке воды; может сопровождаться усилением развития определенной группы болезней листьев и плодов; не учитываются физиологические процессы в растении [87].

Исходя из анализа преимуществ и недостатков способов орошения, Райхман Д. Б. и Зубоченко Д. В. составили таблицу назначения способов полива сельскохозяйственных культур (табл. 1.3) и таблицу условий применения различных способов орошения в неблагоприятных природно – климатических условиях (табл. 1.4) [114].

Основное назначение различных способов орошения
сельскохозяйственных культур*

Способ орошения	Увлажнение почвы	Увлажнение воздуха	Влагозарядка	Промывка от солей	Внесение удобрений	Орошение сточными водами	Терморегуляционное увлажнение растений	Провокационные поливы для роста сорняков
Дождевание	+	+	х	-	+	х	+	+
Поверхностное	+	х	+	+	х	+	-	+
Подпочвенное	+	-	-	-	+	+	-	-
Капельное	+	-	-	-	+	-	-	-
Аэрозольное	-	+	-	-	-	-	+	-

*Примечание: «+» – обеспечивает, «-» – не обеспечивает, «х» – частично обеспечивает

В настоящее время в орошаемом садоводстве имеются различные способы полива: сплошное затопление площади сада, полив только по чашам и чашам с одновременным увлажнением междурядий сада напуском, по чекам, подковообразным лункам – чашам на склонах, по длинным бороздам, коротким затопляемым бороздам, комбинированные способы (по бороздам с одновременной подачей воды в приствольные полосы), дождевание с помощью короткоструйных и дальнеструйных дождевальных аппаратов, дождевальных машин и установок, переносных и стационарных систем с установкой дождевальных насадок на высоте 3-4 м от поверхности почвы, с увлажнением кроны деревьев и у штамбов (дождевание с индивидуальным характером влагообеспечения), капельный полив с внутрипочвенным и наземным увлажнением корнеобитаемого слоя и другие, в частности,

внутрипочвенный полив с раздачей воды через стыки гончарных трубок или перфорацию полиэтиленовых труб [86].

Таблица 1.4

Применение различных способов орошения сельскохозяйственных культур в неблагоприятных природно-климатических условиях*

Способ орошения	Засоленные почвы	Легкие песчаные почвы	Тяжелые почвы	Сложный рельеф	Большие уклоны	Близко расположенные минерализованные воды	Дефицит водных ресурсов	Минерализованная вода	Сильный ветер
Дождевание	-	+	x	+	+	+	+	-	x
Поверхностное	+	x	+	x	x	x	x	x	+
Подпочвенное	+	x	x	x	+	+	+	-	+
Капельное	-	x	+	+	+	+	+	-	+
Аэрозольное	+	+	+	+	+	+	+	-	+

*Примечание: «+» – обеспечивает, «-» – не обеспечивает, «x» – частично обеспечивает

Каждый из этих способов имеет свои особенности, преимущества и недостатки. На выбор того или иного способа влияют многие факторы: условия рельефа, водопроницаемость почвы, глубина залегания грунтовых вод, требования сельскохозяйственных культур и многие другие. В последнее время большие перспективы открываются (особенно при интенсивном садоводстве) по применению капельного и внутрипочвенного способов полива.

В засушливых регионах преобладают поверхностные способы полива. Капельный и внутрипочвенный способы полива изучены слабо и требуют экспериментальной проверки на опытно-производственных участках. Полив

по чашам – один из самых древних способов полива, в котором вода попадает под каждое дерево индивидуально.

К недостаткам этого способа следует отнести большую трудоемкость в изготовлении чаш, необходимость тщательной планировки оснований чаш, применение больших норм полива и неизбежный сброс воды за пределы корнеобитаемого слоя, вымывание легкорастворимых питательных веществ. Переувлажнение почвы в пределах чаши после полива отрицательно влияет на воздушный режим корнеобитаемого слоя. Кроме того, полив по чашам не обеспечивает увлажнения всей зоны распространения корней плодового дерева.

Полив по бороздам характеризуется низкой производительностью и большими затратами труда. Не увлажняется 50...60 % отводимой под плодовые деревья площади. Применение перекрестной нарезки борозд способствует сокращению не увлажняемой части корнеобитаемого слоя почвы до 16...20 %, но при этом удваиваются затраты труда на проведение поливов. Полив по бороздам непригоден на участках с почвами легкого механического состава [17], хотя известно, что перспективой развития орошаемого садоводства предусматривается использование огромных площадей с легким механическим составом почв.

Кроме того, широкое распространение получил способ полива затоплением по чекам. Главные преимущества его: быстрота ввода в эксплуатацию, быстрая окупаемость, определенным образом решает задачу полной механизации орошения. Недостатки: низкий коэффициент использования воды, большие поливные нормы, угроза быстрого поднятия грунтовых вод, требуется тщательная планировка [3]. Комбинированный способ полива предложен Т. И. Гориним в 1956 г. В исследованиях, проведенных О. К. Травиным на Крымской опытной станции садоводства, указано, что урожайность яблок при комбинированном поливе (по бороздам и чекам) была выше на 16,5 %, чем при поливе по бороздам [114].

В последние годы для орошения садов в зоне неустойчивого увлажнения наиболее широкое применение получило дождевание. Интерес к этому способу неуклонно растет. Основным его преимуществом является возможность полной механизации орошения. Особый интерес проявляется к поливу садов дождеванием от стационарной оросительной сети. В Молдавии в настоящее время орошается более 80 % плодовых насаждений. Также в садах может применяться надкрановое дождевание.

В Украинском научно-исследовательском институте орошаемого садоводства разработан полив дождеванием и индивидуальным характером влагообеспечения. Суть его заключается в следующем: через междурядье на глубине 0,25.. 0,40 м укладывается трубопровод; от него к каждому дереву двух смежных рядов делаются ответвления, которые заканчиваются дождевальным аппаратом [3].

Некоторые авторы [114] считают, что наиболее универсальным способом орошения, как для применения различных видов полива (увлажнение почвы, увлажнение воздуха и т.д.), так и для условий, в которых будет осуществляться орошение, является метод дождевания.

В. Х. Арст [6] считает, что ни орошение почвы из капельных увлажнителей, ни подкрановое дождевание не создают оптимальных условий для произрастания сельскохозяйственных культур. В районах с сухим и жарким климатом даже при высокой влажности почвы растения могут испытывать водный дефицит. Как доказано, уже небольшое обезвоживание растительных тканей приводит к приостановке роста и снижению продуктивности растений. С другой стороны, постоянное применение дождевания в плодовом саду кроме опасности недостаточно глубокого промачивания почвы, повышает влажность воздуха, что способствует распространению грибковых заболеваний [144].

Присущие каждому способу полива недостатки можно в ряде случаев устранить совмещением или сочетанием в процессе полива различных, дополняющих друг друга способов полива. Это обеспечит гибкое

регулирование режима влажности корнеобитаемых горизонтов почвы и приземного слоя воздуха в соответствии с биологическими особенностями сельскохозяйственных культур [6].

Кроме того, следует отметить, что исследованиями многих других ученых: В. Г. Корнева, В. Н. Кичигина, В. И. Бобченко, А. А. Богушевского, И. М. Астапова, М. С. Григорова, В. Г. Лабоды, В. И. Гостищева, Г. Ю. Шейнкина, Б. А. Шумакова, В. П. Остапчика, В. Р. Ридигера, А. Д. Ахмедова, Е. А. Ветренко, Е. В. Акутневой, Е. П. Борового и других – была установлена эффективность воздействия внутрипочвенного орошения на развитие и продуктивность растений, повышение производительности труда на поливе в сравнении с поверхностным орошением и дождеванием [3, 13, 12, 22, 23, 24-26, 36-39, 58, 67, 78-79, 117, 99, 145, 149].

Уже сейчас нет сомнения в том, что среди перспективных способов орошения, в том числе плодовых насаждений, одним из основных является внутрипочвенное. Использование внутрипочвенного орошения позволяет автоматизировать процесс полива, оптимизировать водно-воздушный режим почвы, сохранить и улучшить ее структуру, обеспечить наиболее благоприятное для растений капиллярное увлажнение почвы. В результате этого урожайность сельскохозяйственных культур возрастает на 35-40 % [25] при минимальных затратах поливной воды и ручного труда даже в сравнении с дождеванием.

При внутрипочвенном орошении неровности рельефа преодолеваются за счет пьезометрического напора, тогда как при поверхностном неравномерность полива служит причиной засоления.

Таким образом, исследуя параметры систем внутрипочвенного орошения можно добиться более экономного использования оросительной воды, снизить стоимость строительства, затраты на эксплуатацию, увеличить урожайность сельскохозяйственных культур, тем самым повысить экономическую эффективность внутрипочвенного орошения.

1.4 Анализ конструкций техники, технических средств и систем для орошения

Эффективность орошения садов зависит не только от соблюдения рационального поливного режима, но и от способа и техники проведения полива.

Существенным недостатком, тормозящим внедрение внутрипочвенного орошения в производство, является слабая практическая и теоретическая разработка его приемов, отсутствие широкой экспериментальной проверки этого способа полива.

Современные способы и техника полива должны обеспечивать создание оптимальных условий для выращивания плодовых культур; способствовать сохранению структуры почвы; проведению поливов с минимальным расходом оросительной воды на единицу площади; получению высоких урожаев с хорошим качеством плодов; препятствовать возникновению водной эрозии; механизировать и автоматизировать процесс полива; регулировать в определенном диапазоне водный, питательный и воздушный режимы почвы и растений; повышать степень надежности и коэффициент полезного действия оросительных систем; уменьшать энергетические затраты [16, 153].

В связи с достаточно большими капиталовложениями на строительство систем внутрипочвенного орошения, необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на уменьшение стоимости этих систем и увеличение их экономической эффективности путем совершенствования существующих конструкций систем внутрипочвенного орошения и методов расчета режима и техники полива.

Основной конструктивный элемент, определяющий особенности системы подпочвенного (внутрипочвенного) орошения, – увлажнители, конструкция и материал которых могут влиять на характер и распределение воды и увлажнения почвы.

Увлажнители распределяют поливную воду, удобрения, воздух и тепло по площади орошения. От конструкции внутрипочвенных увлажнителей зависит надежность работы оросительной системы, характер увлажнения почвы и размер затрат на строительство. По способу устройства внутрипочвенных увлажнителей различают **внутрипочвенное орошение по трубам**, выполненным из различных материалов (керамические трубы, пустотелый кирпич, черепица, доски и т.п.) и по, так называемым, **кротовинам**, нарезка которых осуществляется специальными механизмами, путем выдавливания в почве цилиндрической или иной формы полости [40].

Наибольшее производственное применение нашли трубчатые системы внутрипочвенного орошения. Испытано множество различных видов труб – это гончарные и керамические с выходом воды в стыках, через отверстия, щели в стенках труб, бетонные, песчано-битумные, из толя и другие.

Уже с прошлого века применяется внутрипочвенное орошение по гончарным и керамическим трубкам с выпусками воды через стыки. Наиболее часто применялись гончарные трубки длиной 333 и 500 мм с внутренним диаметром 50 и 75 мм. Для предотвращения деформаций трубок и заиливания последних стыки прикрываются гончарными муфтами либо обертываются лентой полиэтиленовой пленки.

Использование гончарных трубок позволяет выполнять увлажнители длиной до 300 м при оптимальных уклонах 0,001...0,0005. Величина напора в голове увлажнителя не должна превышать глубину укладки последнего более, чем на 0,1...0,15 м.

Учитывая значительную трудоемкость при укладке увлажнителей, большие потери воды на фильтрацию, гончарные трубки укладываются стык к стыку на желоб из полиэтиленовой пленки, а сверху прикрываются другой пленкой равной ширины [24].

В последнее время предпочтение стали отдавать трубам из полимерных материалов – полиэтиленовым и полихлорвиниловым с выходом воды через перфорации и щели. Это связано с тем, что строительство системы

внутрипочвенного орошения при этом значительно дешевле и укладка труб может быть полностью механизирована. Гончарные трубки достаточно прочны, не подвергаются коррозии, имеют небольшую стоимость, однако значительная масса их, сложность механизированной укладки, бой при транспортировке сдерживают производственное внедрение систем внутрипочвенного орошения с такими увлажнителями.

Полиэтиленовые же трубы обладают малой массой, эластичностью, высокой механической прочностью и химической стойкостью. Строительные расходы при бестраншейной укладке полиэтиленовых труб сокращаются на 60 - 80 % [30]. Выполнение различных перфораций в таких трубах позволяет уменьшить заиливание и зарастание корнями растений внутренней полости увлажнителей.

При использовании цельнотянутых труб в качестве увлажнителей упростился процесс строительства участков внутрипочвенного орошения, особенно с применением бестраншейных трубоукладчиков. Отпадает одна из самых трудоемких работ – выполнение стыков труб, нет опасности смещения стыков в траншею и выхода из строя увлажнителей. Как следствие – увеличивается надежность в эксплуатации участков внутрипочвенного орошения.

Укладка труб в почвах может осуществляться *траншейным, узкотраншейным и бестраншейным способами.*

Траншейный и узкотраншейный способы укладки труб характеризуются значительным объемом работ, выносом минеральной почвы на дневную поверхность и смешиванием последней с гумусным слоем при засыпке траншей. Кроме того, конструкция современных траншейных трубоукладчиков характеризуется наличием значительного количества кинематических связей, что при работе в условиях абразивной среды приводит к частым поломкам. Такие трубоукладчики теряют трудоспособность на пластических липких почвах.

Глубину закладки трубчатых увлажнителей рекомендуется выдерживать в пределах 0,45...0,5 м, т.к. во время механизированной обработки почвы возможно повреждение последних сельскохозяйственными орудиями и машинами.

Проектирование и строительство систем внутрпочвенного орошения с трубчатыми увлажнителями может быть осуществлено при уклонах от 0,0001 до 0,001 и более. Участки перед укладкой увлажнительной сети должны подвергаться обязательной планировке [24].

То есть, применение полиэтиленовых труб в мелиоративной практике способствовало расширению и углублению работ в области внутрпочвенного орошения.

Наиболее широкие исследования внутрпочвенного орошения проведены в Узбекистане (в Голодной степи). Полиэтиленовые трубки-увлажнители закладывали как с помощью узкотраншейного экскаватора, так и бестраншейным способом. Применялись трубки диаметром от 38 до 16 мм с перфорацией диаметром 1,5...2 мм и расстоянием между увлажнителями от 0,9 до 1,8 м.

Уклон вдоль увлажнителей длиной до 200 м был равен 0,002 – 0,01.

В зарубежных источниках описаны преимущественно деляночные опыты, где изучалась связь различных конструкций увлажнителей с урожаем и расходом воды. Испытывались пластмассовые трубки малого диаметра с колотой и сверленной перфорацией, а также с щелевыми водовыпусками. Позднее перфорацию стали защищать специальными козырьком, пружинными клапанами, открывающимися только на время полива. Применение эластомеров для изготовления трубок позволило выполнять щелевые отверстия, перекрывающиеся за счет эластичности самого материала без помощи пружин. Принцип их действия основан на раскрытии щелей при понижении напора в увлажнителе и закрытии при увеличении напора.

Имеется множество других решений для выравнивания раздачи воды по длине трубок-увлажнителей: применение асбестовых или нейлоновых фитилей, изменение плотности волокон по длине трубки. Для защиты перфорации от забивки применяют также пластмассовые насадки, которыми оснащаются увлажнители при укладке в почву. Как правило, для укладки увлажнителей применяют бестраншейный способ, в том числе модифицированные сельскохозяйственные орудия.

Внутрипочвенно-кротовое орошение является наиболее дешевым и доступным. При этом способе полива увлажнители имеют вид «земляных труб», называемых искусственными с хорошо выраженной капиллярностью. Широкое внедрение в производство внутрипочвенно-кротового орошения сдерживается из-за короткого срока службы таких систем. Для уменьшения проникновения воды в глубокие слои почвы (особенно на почвах с высокой фильтрацией) и лучшего распространения ее в горизонтальном направлении на трубчатых системах внутрипочвенного орошения устраивают различные противофильтрационные экраны, выполненные из полиэтиленовой пленки, рубероида, стекловаты и т.д. [3].

Исследователями Германии были поставлены широкие опыты с внутрипочвенным орошением по методу Нидервеммера [90].

Предложенная Нидервеммером система внутрипочвенного орошения для условий аридной зоны западной части Турции на хлопчатнике (средиземноморское побережье) достаточно дорогостоящая, однако эксплуатационные затраты меньше, чем при дождевании в 3,4 раза.

Наилучшие результаты внутрипочвенное орошение давало при укладке пленочного экрана на глубине 0,8 м, на который помещался полиэтиленовый трубопровод малого диаметра через 3 м. Отмечено, что пленочный экран шириной 2 м ограничивал накопление зимне-весенней влаги в период дождей, поэтому поливы приходилось начинать раньше. Наличие фильтра из послойно переработанного грунта (сначала на экран попадают крупные

фракции, затем средние и мелкие) создает благоприятные условия для бокового распределения воды по полосе шириной 2...4 м.

Ряд ученых: С. В. Кравец, О. Л. Романовский, М. Д. Каслин, В. М. Супонев [56, 70-73, 120-122, 135] подтвердили целесообразность прокладки подземных коммуникаций *бестраншейным* способом. Он избавляет от недостатков, которые свойственны траншейному и узкотраншейному способам и снижает себестоимость строительства на 12 % [7].

Основные преимущества бестраншейного способа прокладки подземных коммуникаций [135, 73]:

- высокая рабочая скорость прокладки (до 5 км/час), а с нею и производительность труда;
- уменьшение объема земляных работ в 3-5 раз за счет совмещения процессов формирования щели, подачи и кладки трубы и закрытия щели;
- сохранение гумусного слоя на поверхности почвы и, соответственно, минимизация техногенного влияния на окружающую среду;
- возможность использования в обвальных почвах, а также в почвах с высоким уровнем стояния грунтовых вод.

Анализ патентной и научно-технической литературы показал, что существует ряд технических решений, направленных на выполнение операций по укладке трубопроводов бестраншейным способом, который базируется на принципе вертикального заглубления гибких трубопроводов [104].

Известны методы бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций – горизонтальная проходка в грунтах и протягивание (протаскивание) в образовавшуюся скважину отдельных модулей труб или плетей трубопроводов.

Проходка горизонтальных (наклонных) скважин, а также вертикальных стволов и протягивание в них трубопроводов могут производиться следующими методами: горизонтальное (наклонное) направленное бурение

(в том числе шнековое), микротоннелирование, ударно-импульсное продавливание, раскатка скважин.

Раскатка скважин представляет собой непрерывный процесс образования в грунте цилиндрической полости путем деформации и уплотнения грунта раскатывающим механизмом, или раскатчиком (рис. 1.1) [111].



Рис. 1.1 Раскатчик скважин РТ-470 с закрепленной в хвостовой части трубной плетью для протаскивания в горизонтальную скважину

Преимуществом метода раскатки по сравнению с горизонтальным (наклонным) направленным бурением является отсутствие необходимости использования передвижных насосных установок (для подачи воды к буровому инструменту) или компрессора (для подачи сжатого воздуха к пневмопробойнику). Кроме того, при использовании раскатчиков полностью исключается просадка грунта на поверхности.

Именно на основе данного метода в сельском хозяйстве используется внутрипочвенно-кротовое орошение, которое является наиболее дешевым и доступным.

Известными есть технические решения, направленные на разработку конструкций рабочих органов для осуществления многоярусной разработки грунта [19, 103, 104], которая характеризуется наименьшей энергоемкостью.

Также известны ножевые кабеле- и трубоукладчики [104], работа которых основывается на принципе разрезания почвы.

Для прокладывания пластмассовых трубопроводов используют укладчики на базе колесных и гусеничных тракторов. По типу базового шасси можно использовать прицепные, навесные и полунавесные трубоукладчики [71].

Так например, трубоукладчик STR 150 (рис. 1.2) (Австралия) укладывает оросительные трубопроводы диаметром до 70 мм на глубину до 0,6 м.

Рабочее оборудование включает вертикальный разрезной нож с незаостренной резальной кромкой и долотообразный нож, а также трубонаправляющее устройство для подачи труб.



а



б

Рис. 1.2 Трубоукладчик STR 150: а – рабочее оборудование трубоукладчика; б– трубоукладчик STR 150 в рабочем положении

Трубоукладчик Caterpillar (США) на базе гусеничного трактора Caterpillar D6H (рис. 1.3) выполнен в виде ножа-распушителя с шарнирно закрепленным трубонаправляющим устройством для подачи трубопровода диаметром до 70 мм [112]. Глубина укладки труб до 0,6 м.



а



б

Рис. 1.3 Трубоукладчик Caterpillar D6H: а – рабочее оборудование трубоукладчика; б - трубоукладчик Caterpillar D6H в рабочем положении

В укладчиках труб КУ – 25 и КУ – 120 в качестве рабочего оборудования используются долотообразные ножи. Эти укладчики предназначены для бестраншейного укладки полиэтиленовых труб толщиной 35-75 мм на глубину 1,2 м с одновременным прокладыванием контрольной ленты [113].

То есть, рабочие органы бестраншейных укладчиков труб имеют простую конструкцию, высокую надежность и сравнительно невысокую стоимость. В сравнении с траншейными их удельная энергоемкость на 15 – 20 %, а удельная металлоемкость на 40-50 % меньше [136], что существенно увеличивает возможности применения бестраншейного способа.

1.5 Выводы по разделу

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что наиболее перспективным способом орошения плодовых насаждений и

виноградников в условиях Ирака следует считать внутрпочвенное орошение.

В качестве увлажнителей рекомендуются тонкостенные гофрированные трубы диаметром 25...50 мм с перфорацией во впадинах гофра; диаметр отверстий – не более 1 мм, число отверстий от 100 до 600 на метр; диаметр трубок-увлажнителей – постоянный по всей длине.

Обязательным условием является защита перфорации путем оборачивания трубки рулонным негниющим материалом (капрон, стеклоткань, полиэтиленовая пленка или их комбинация).

Все рассмотренные способы укладки труб не позволяют достичь оптимальных условий для сохранения и распространения влаги при внутрпочвенном орошении сельскохозяйственных растений.

Наиболее приемлемым для этого является бестраншейный способ укладки труб-увлажнителей, который базируется на принципе вертикального заглубления гибких трубопроводов в почву. При этом используются кротователи различной геометрической формы и размеров.

Однако рассмотренный способ не позволяет укладывать противofильтрационный экран совместно с увлажнителем. В связи с этим, исследования следует направить на обоснование геометрических параметров и режимов работы рабочего органа для образования кротовины, разработку способа и технического решения бестраншейной укладки увлажнителей совместно с противofильтрационным экраном.

РАЗДЕЛ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ УКЛАДКИ УВЛАЖНИТЕЛЕЙ

2.1 Описание процесса укладки оросительной трубы с противофильтрационным экраном

В зоне истекания воды из оросителя почва получает полное влагонасыщение вследствие интенсивного поступления в него оросительной воды. Результатом этого является процесс фильтрации, который сопровождается интенсивным переносом воды в нижние слои почвы. При этом процесс диффузионного переноса влаги от более влажных участков к более сухим уменьшается. Это приводит к существенному уменьшению зоны увлажнения в направлении, перпендикулярном оси оросительной трубы, и параллельном поверхности поля. Для предотвращения интенсивного фильтрационного процесса в зоне истекания поливной воды применяется противофильтрационный экран, который позволяет снизить фильтрационные процессы и увеличить зону истекания поливной воды в направлении, поперечном направлению укладки оросительной трубы, и выровнять зону истекания воды между отверстиями оросителя.

Схема такой укладки оросителя представлена на рис. 2.1.

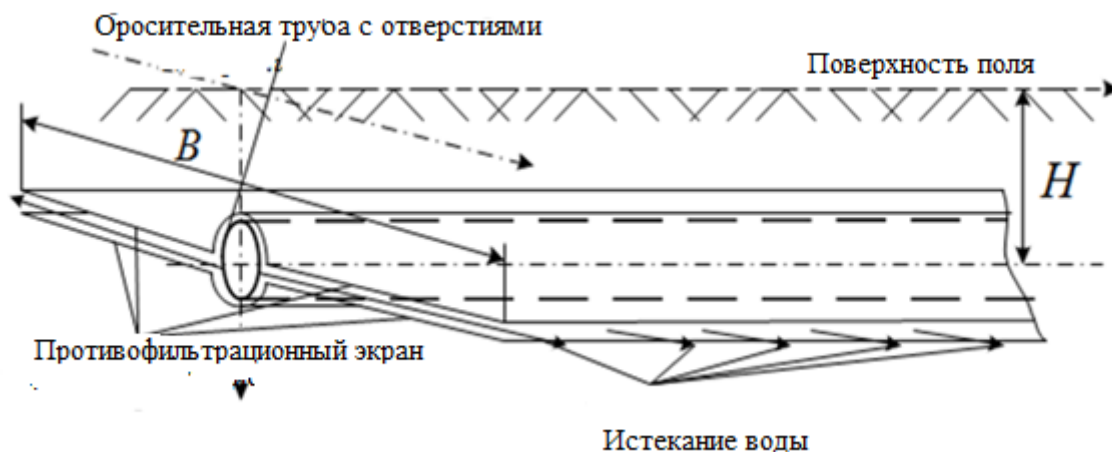


Рис. 2.1 Схема укладки оросительной трубы с противофильтрационным экраном

2.2 Анализ процесса образования кротовин для укладки увлажнителя с противофильтрационным экраном

Во многих процессах, связанных с изменением механических свойств почвы при строительстве ирригационных и инженерных сооружений, возникают задачи об образовании дрен внутри почвенного горизонта. При этом используются кротователи различной геометрической формы и размеров. В частности, для прокладки дренажных (оросительных) трубопроводов либо кабелей методом протяжки возникает необходимость образования полости (с целью снижения сопротивления трения протягивания), по которой протягивается коммуникация. Поэтому обоснование геометрических параметров и режимов работы рабочего органа для образования этой полости является актуальной научной задачей.

Анализируя состояние исследований взаимодействия рабочих органов с почвой, следует отметить существование двух составляющих данного вопроса. Первый относится к формализации самой почвы, как среды, на которую направлено действие рабочего органа, а второй относится к формализации взаимодействия самого рабочего органа с почвой и вытекает из способа формализации почвы и, следовательно, возможности самой схемы формализации взаимодействия. Относительно первого вопроса следует отметить, что за последнее десятилетие существенных изменений в формализации почвы (грунта) не произошло. Поэтому по форме представления модели строения почвы все работы, которые касаются взаимодействия с нею рабочих органов, можно разделить на пять групп: 1) твердое тело; 2) сплошная упругая среда; 3) сплошная несжимаемая сыпучая среда; 4) сплошная упруго-вязко-пластическая среда; 5) формализация методами теории подобия и размерностей [5, 15, 34, 42, 68, 77]. Исходя из этого, чаще всего используются модели, больше напоминающие взаимодействие с абсолютно твердым телом, или модели, используемые в классической теории механики грунтов, которые основаны на механике сыпучих сред [130]. Кроме того, при построении моделей взаимодействия

чаще всего используются либо одномерные модели, либо в лучшем случае плоские решения, которые не всегда отображают реальный процесс изменений свойств почвы (грунта) под действием рабочего органа [75, 77].

При этом следует отметить, что плотность почвы (грунта) под воздействием рабочего органа изменяется в функции изменения всех шести компонент деформаций или напряжений, что не может быть отображено в плоской постановке задачи, а тем более – в одномерной. Кроме того, такие постановки задачи не позволяют определить все три составляющие сопротивления движению рабочего органа в почве (грунте). Поэтому решение задачи о взаимодействии рабочего органа с почвой (грунтом) в трехмерной постановке с установлением взаимосвязи геометрических параметров и режимов работы самого рабочего органа и изменением свойств почвы (грунта), а также компонент тягового сопротивления является актуальной задачей, которая требует решения.

Следует отметить, что наиболее адекватным методом формализации почвы (грунта), который может быть использован для решения задач о нахождении рациональных геометрических форм и режимов движения рабочих органов, является метод, когда почву (грунт) можно представить в виде сплошной деформируемой среды с проявлением таких свойств, как упругость, вязкость и пластичность [52, 60, 75, 77].

При этом при решении контактных задач взаимодействия рабочих органов с почвой (грунтом) при такой формализации часто бывает достаточно решить задачу в упругой (малая скорость движения рабочего органа) или вязкоупругой постановке. Такие решения позволяют использовать аналитические методы нахождения компонент деформаций, напряжений, составляющих сил сопротивления движению рабочего органа и определять направление изменений плотности почвы или даже сами ее изменения. То есть, решения задачи до наступления пластичности или разрушения сплошности почвы (грунта) позволяет прогнозировать развитие

дальнейших процессов изменения ее свойств в зависимости от геометрических параметров и режимов движения рабочего органа.

В связи с этим необходимо определить скорости относительных деформаций в зоне контакта конусного кротователя и его лемешной части с почвой в зависимости от геометрических и кинематических параметров рабочего органа, а также установить функции изменения плотности почвы и составляющих сил сопротивления движению кротователя в зависимости от его геометрических параметров, скорости движения и механических свойств почвы.

2.3 Анализ уплотнения почвы конусным наконечником рабочего органа для образования кротовин

В самом общем случае геометрические параметры и режимы работы рабочего органа могут быть представлены в виде схемы, приведенной на рис. 2.2.

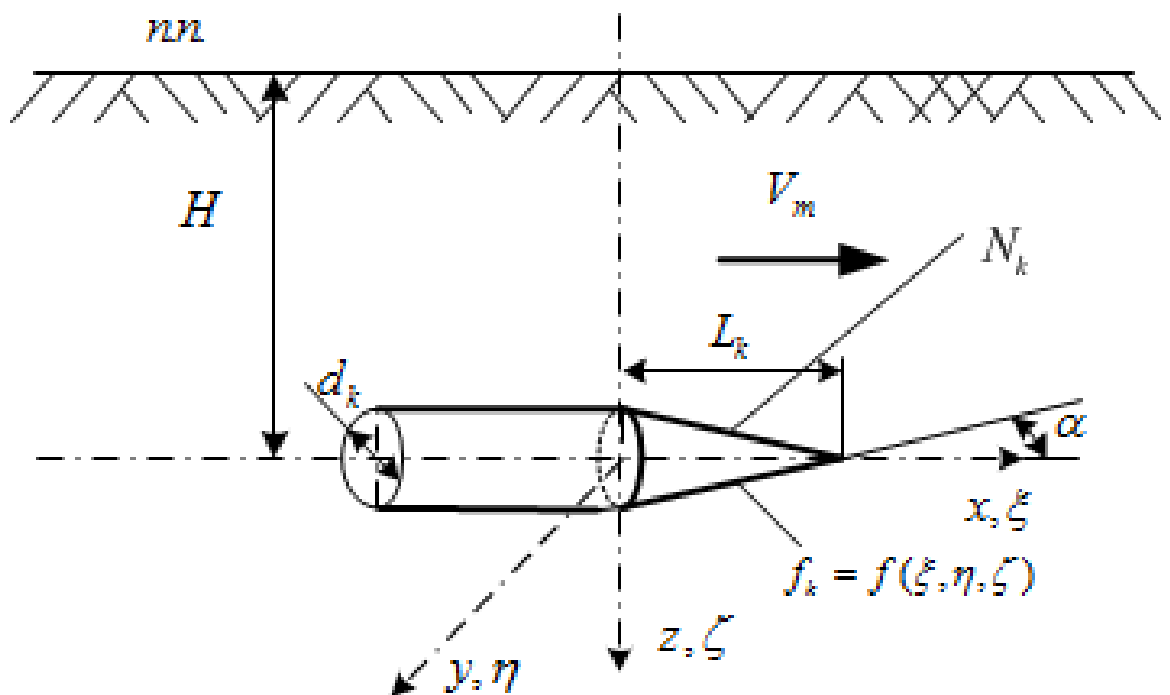


Рис. 2.2 Схема конусного рабочего органа для образования кротовины

Рассмотрим работу конусной части рабочего органа.

Рабочий орган представлен составным телом, состоящим из конусной части, которая переходит в цилиндрическую. Основная рабочая часть, которая взаимодействует с почвой (грунтом), – это конусная часть. Рабочий орган движется в направлении оси ox на глубине H от поверхности почвы со скоростью V_m .

Форма поверхности конуса в системе координат ξ, η, ζ , которая совпадает с системой координат почвы (грунта) x, y, z , может быть представлена уравнением для действительного конуса в неявном виде:

$$f_k = -\frac{\xi^2}{a^2} + \frac{\eta^2}{b^2} + \frac{\zeta^2}{c^2} = 0.$$

Для случая прямолинейной образующей и осевой симметрии относительно оси $o\xi$ коэффициенты $a = b = r$, а коэффициент $a = \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha}$, где α – угол наклона образующей к оси $o\xi$.

В этом случае, с учетом смещения острия конуса на величину L_k , уравнение конуса будет иметь вид:

$$-\frac{(L_k - \xi)^2}{r^2} + \frac{\eta^2 + \zeta^2}{a^2} = 0.$$

Уравнения координат поверхности конуса выразятся зависимостями:

$$\xi = \frac{a^2 L_k \pm \sqrt{a^2 r^2 \zeta^2 + a^2 r^2 \eta^2}}{a^2},$$

$$\eta = \pm \frac{\sqrt{a^2 L_k^2 - r^2 \zeta^2 - 2a^2 L_k \xi + a^2 \xi^2}}{r}$$

$$\zeta = \pm \frac{\sqrt{a^2 L_k^2 - r^2 \eta^2 - 2a^2 L_k \xi + a^2 \xi^2}}{r},$$

где r – радиус конуса у основания.

Косинусы углов наклона нормали к поверхности конуса к осям координат $o\xi, o\eta, o\zeta$ выразятся зависимостями:

$$l_k = \frac{\partial f_k / \partial \xi}{\sqrt{(\partial f_k / \partial \xi)^2 + (\partial f_k / \partial \eta)^2 + (\partial f_k / \partial \zeta)^2}},$$

$$m_k = \frac{\partial f_k / \partial \eta}{\sqrt{(\partial f_k / \partial \xi)^2 + (\partial f_k / \partial \eta)^2 + (\partial f_k / \partial \zeta)^2}},$$

$$n_k = \frac{\partial f_k / \partial \zeta}{\sqrt{(\partial f_k / \partial \xi)^2 + (\partial f_k / \partial \eta)^2 + (\partial f_k / \partial \zeta)^2}}.$$

Далее, если спроектировать скорость поступательного движения V_m на нормаль к поверхности конуса и далее эту нормальную составляющую спроектировать на оси координат $o\xi, o\eta, o\zeta$, то можно получить компоненты скоростей перемещений на оси координат в виде:

$$u_{k0} = V_m; v_{k0} = \frac{r^2 V_m \eta}{a^2 (L_k - \xi)}; w_{k0} = \frac{r^2 V_m \zeta}{a^2 (L_k - \xi)}$$

Эти выражения будут исходными для решения контактной задачи взаимодействия конуса с почвой (грунтом) в кинематической постановке.

Аналитические решения для контактных задач возможны лишь в упругой или упруго-вязкой постановке. Причем эти решения допускаются лишь для случая, когда при последовательных подстановках геометрических уравнений в физические уравнения связи напряжений с деформациями и дальнейшей подстановки полученных компонент напряжений в уравнения статики (динамики) сплошной среды будут получены уравнения эллиптического типа. В таком случае решение может быть найдено при использовании бигармонических потенциальных функций, которые удовлетворяют условия на поверхности контакта тела (система координат ξ, η, ζ) и среды, с которой оно взаимодействует (система координат x, y, z), т. е. при $x - \xi = 0, y - \eta = 0, z - \zeta = 0$ компоненты скоростей (перемещений) равны их начальным значениям.

Для нашего случая это означает, что компоненты скоростей для конуса имеют вид:

$$u_k \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} = u_{k0},$$

$$v_k \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} = v_{k0},$$

$$w_k \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} = w_{k0}.$$

Второе условие, которому должны удовлетворять бигармонические потенциальные функции, имеет вид:

$$u_k \Big|_{x-\xi=\infty, y-\eta=\infty, z-\zeta=\infty} \rightarrow 0,$$

$$v_k \Big|_{x-\xi=\infty, y-\eta=\infty, z-\zeta=\infty} \rightarrow 0,$$

$$w_k \Big|_{x-\xi=\infty, y-\eta=\infty, z-\zeta=\infty} \rightarrow 0.$$

Такие бигармонические потенциальные функции, согласно А. И. Лурье [82], имеют вид:

$$\begin{aligned} u_k &= \int_{\eta_{k0}}^{\eta_{kk}} \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \frac{a_0 u_{k0} (x - \xi_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_i + \delta)^2)^{3/2}} d\zeta_k d\eta_k; \\ v_k &= \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \int_{\xi_{k0}}^{\xi_{kk}} \frac{a_0 v_{k0} (y - \eta_i + \delta)}{((x - \xi_i + \delta)^2 + (y - \eta_i + \delta)^2 + (z - \zeta_i + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_k d\zeta_k; \\ w_k &= \int_{\eta_{k0}}^{\eta_{kk}} \int_{\xi_{k0}}^{\xi_{kk}} \frac{a_0 w_k (z - \zeta_i + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_i + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_k d\eta_k, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $\xi_{k0}, \eta_{k0}, \zeta_{k0}, \xi_{kk}, \eta_{kk}, \zeta_{kk}$ – начальные и конечные значения координат

конуса, $a_0 = \frac{1}{\pi} \frac{4}{\text{Log}[-\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}] - \text{Log}[\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}]}$ – коэффициент,

обеспечивающий выполнение начальных условий при введении малой величины δ , которая устраняет сингулярность выражений (2.1).

Бигармонические потенциальные функции должны удовлетворять уравнению $\Delta^2 f = 0$, где Δ – оператор Лапласа, а $f = \{u_k, v_k, w_k\}$ (рис. 2.3).

В связи со сложностью интегрирования уравнений (2.1), которые представляют собой компоненты скоростей перемещений почвы (грунта) в пространстве перед рабочим органом в общем виде, можно решать задачу о нахождении распространения скоростей перемещений, скоростей относительных деформаций, компонент напряжений в дифференциальном виде, как это было предложено в [60, 64].

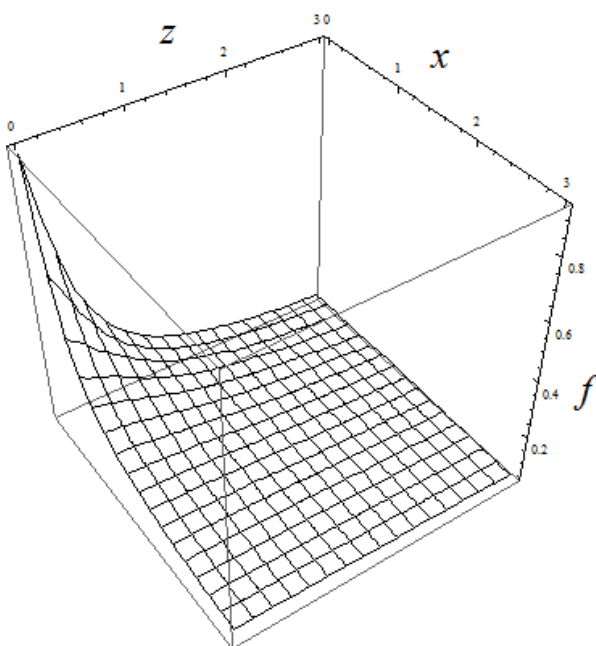


Рис. 2.3 Графическое представление вида функций (2.1)

Суть метода состоит в том, что для нахождения компонент скоростей деформаций предполагается дифференцирование уравнений (2.1) согласно геометрическим уравнениям (уравнениям Коши) теории сплошных сред.

Для этого можно преобразовать уравнения (2.1) таким образом, в результате которого будут получены компоненты дифференциальных составляющих компонент скоростей смещений почвы (грунта) перед рабочим органом:

$$\begin{aligned}
du_k &= \frac{d^2}{d\eta_k d\zeta_k} \int_{\eta_{k0}}^{\eta_{kk}} \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \frac{a_0 u_{k0}(x - \xi_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} d\zeta_k d\eta_k = \\
&= \frac{a_0 u_{k0}(x - \xi_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} = \\
&= \frac{a_0 V_m(x + \delta - \xi_k)}{((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{3/2}}; \\
dv_k &= \frac{d^2}{d\zeta_k d\xi_k} \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \int_{\xi_{i0}}^{\xi_{kk}} \frac{a_0 v_{k0}(y - \eta_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_k d\zeta_k = \\
&= \frac{a_0 v_{k0}(y - \eta_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} = \\
&= \frac{a_0 r^2 V_m(y + \delta - \eta)\eta}{a^2((z + \delta - \zeta)^2 + (y + \delta - \eta)^2 + (x + \delta - \xi)^2)^{3/2}(Lk - \xi)}; \\
dw_k &= \frac{d^2}{d\eta_k d\zeta_k} \int_{\eta_{k0}}^{\eta_{kk}} \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \frac{a_0 w_k(z - \zeta_i + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_k d\eta_k = \\
&= \frac{a_0 w_k(z - \zeta_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} = \\
&= \frac{a_0 r^2 V_m(z + \delta - \zeta_k)\zeta_k}{a^2((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_i + \delta)^2)^{3/2}(Lk - \xi_k)}.
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Из уравнений (2.2) можно получить дифференциальные компоненты скоростей деформаций почвы (грунта), используя геометрические уравнения (уравнения Коши):

$$d\dot{\epsilon}_{xk} = \frac{d}{dx} du_k = \frac{a_0 V_m((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 - 2(x + \delta - \xi_k)^2)}{((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2}};$$

$$d\dot{\epsilon}_{yk} = \frac{d}{dy} dv_k = \frac{a_0 r^2 V_m \eta_k ((z + \delta - \zeta_k)^2 - 2(y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (L_k - \xi_k)};$$

$$d\dot{\epsilon}_{zk} = \frac{d}{dz} dw_k = \frac{a_0 r^2 V_m \zeta_k (-2(z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (L_k - \xi_k)};$$

(2.3)

$$d\dot{\gamma}_{xyk} = \frac{d}{dy} du_k + \frac{d}{dx} dv_k = \frac{3a_0 V_m (y + \delta - \eta_k)(r^2 \eta_k + a^2 (L_k - \xi_k))(x + \delta - \xi_k)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (-L_k + \xi_k)};$$

$$d\dot{\gamma}_{xzk} = \frac{d}{dz} du_k + \frac{d}{dx} dw_k = \frac{3a_0 V_m (z + \delta - \zeta_k)(r^2 \zeta_k + a^2 (L_k - \xi_k))(x + \delta - \xi_k)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (-L_k + \xi_k)};$$

$$d\dot{\gamma}_{yzk} = \frac{d}{dz} dv_k + \frac{d}{dy} dw_k = \frac{3a_0 r^2 V_m (z + \delta - \zeta_k)(y + \delta - \eta_k)(\zeta_k + \eta_k)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (-L_k + \xi_k)},$$

где $d\dot{\epsilon}_{xk}, d\dot{\epsilon}_{yk}, d\dot{\epsilon}_{zk}, d\dot{\gamma}_{xyk}, d\dot{\gamma}_{xzk}, d\dot{\gamma}_{yzk}$ – компоненты дифференциальных составляющих скоростей относительных нормальных и сдвиговых деформаций почвы (грунта) перед конусным рабочим органом.

Для понимания характера воздействия рабочего органа в зоне непосредственного контакта с почвой (грунтом), а именно его геометрических форм и размеров, на изменения компонент относительных деформаций выражения (2.3) можно проинтегрировать согласно выражениям (2.1), учитывая то, что анализу подлежит зона непосредственного контакта, а именно условия: $\{\zeta_k - z = 0, \eta_k - y = 0, \xi_k - x = 0\}$. Это существенно упрощает выражения (2.3). К сожалению, в развернутом виде привести конечные выражения компонент скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{xk}, \dot{\epsilon}_{yk}, \dot{\epsilon}_{zk}, \dot{\gamma}_{xyk}, \dot{\gamma}_{xzk}, \dot{\gamma}_{yzk}$, не представляется возможным из-за громоздкости конечных выражений. Графическая интерпретация этих выражений представлена на рис. 2.4 – 2.5.

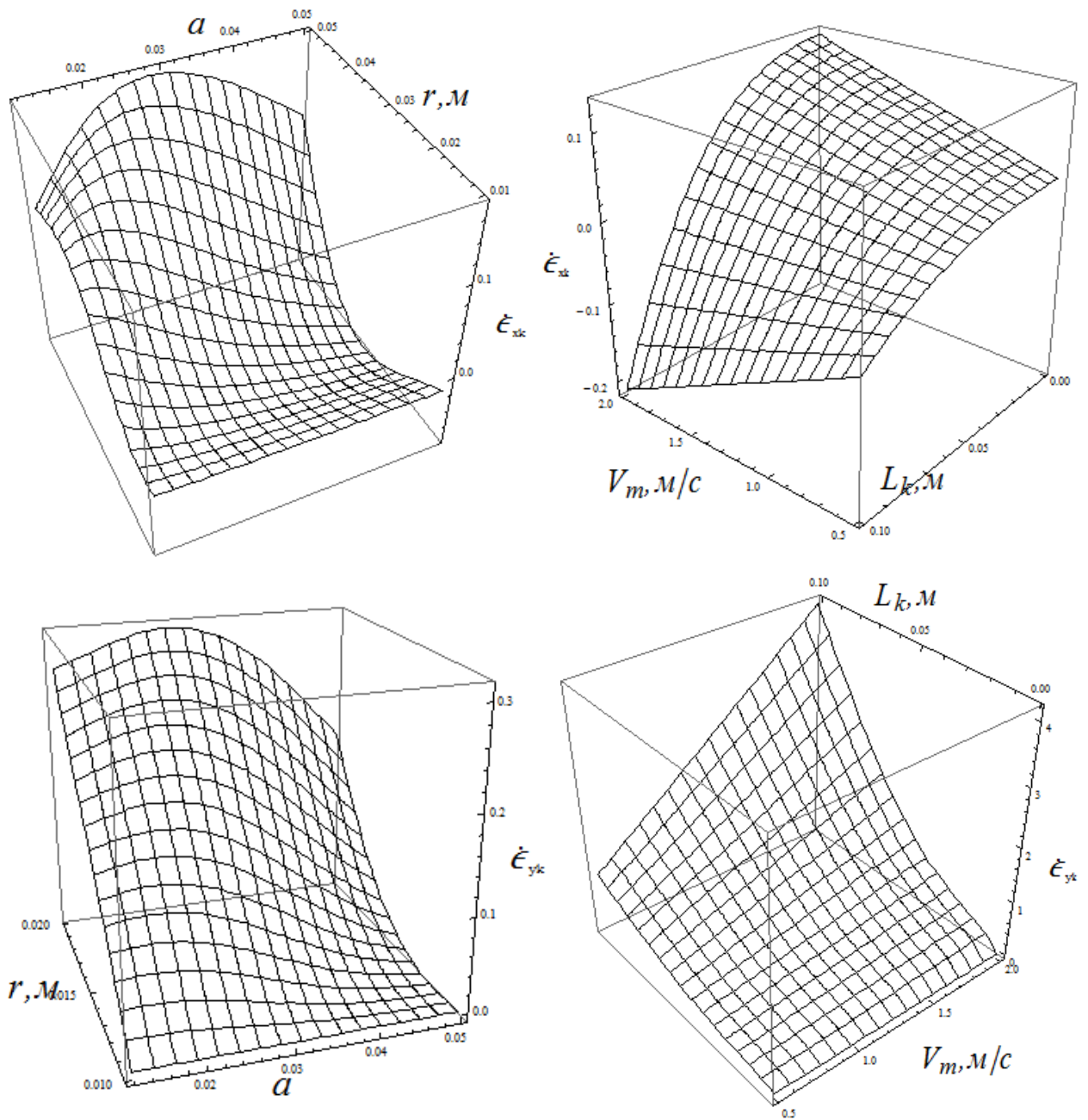


Рис. 2.4 Графики изменений компонент скоростей нормальных деформаций $\dot{\epsilon}_{xk}, \dot{\epsilon}_{yk}$ в зависимости от остроты конуса a , выноса острия L_k , радиуса основания r и скорости его перемещения в почве (грунта) V_m

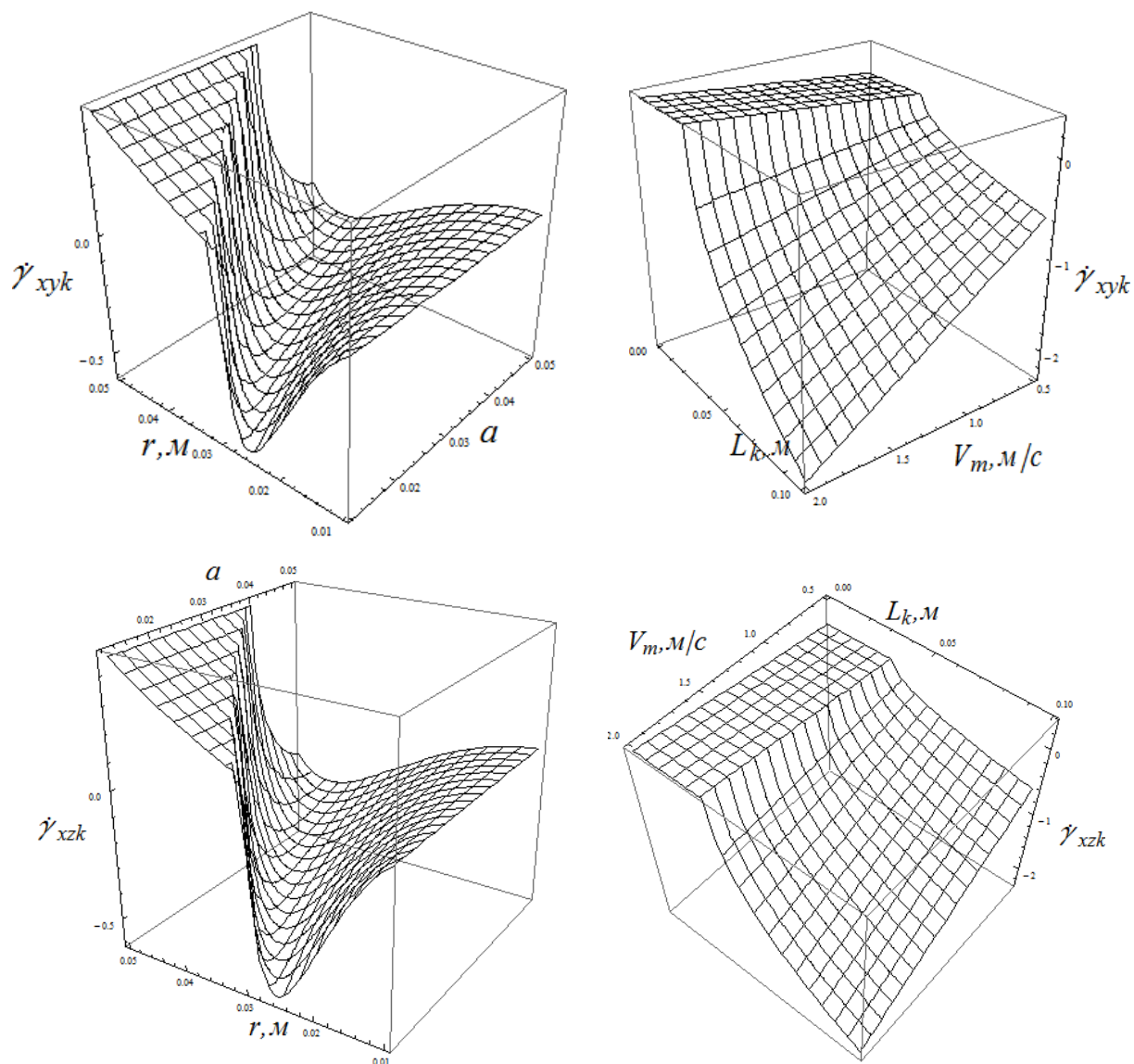


Рис. 2.5 Графики изменений компонент скоростей сдвиговых деформаций $\dot{\gamma}_{xyk}, \dot{\gamma}_{xzk}$ в зависимости от остроты конуса a , выноса острия L_k , радиуса основания r и скорости его перемещения в почве (грунте) V_m .

Вследствие симметрии конуса относительно оси $O\xi$ компонента скоростей нормальной деформации $\dot{\epsilon}_{zk}$ аналогична $\dot{\epsilon}_{yk}$.

Аналогично, вследствие симметрии конуса относительно оси $O\xi$ компонента скоростей сдвиговой деформации $\dot{\gamma}_{xyk}$ аналогична $\dot{\gamma}_{xzk}$.

Анализ продольных нормальных скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{xk}$ почвы (грунта) под действием конусного рабочего органа свидетельствует о том, что с увеличением радиуса r основания конуса скорость деформации возрастает, при этом уменьшение остроты конуса α ведет сначала к росту скорости деформации до значения $\dot{\epsilon}_{xk} = 0.03$, а дальнейшее уменьшение остроты ведет к уменьшению скорости деформации, причем это проявляется в большей степени при увеличении радиуса основания.

Скорость V_m движения конуса не оказывает существенного влияния на скорость нормальной компоненты деформаций $\dot{\epsilon}_{xk}$, в то время как вынос острия конуса L_k вперед по оси от точки, в которой анализируется компонента деформации, приводит к снижению данной компоненты скорости деформации.

Анализ поперечных компонент нормальных скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{yk}, \dot{\epsilon}_{zk}$ почвы (грунта) под действием конусного рабочего органа свидетельствует о том, что с увеличением радиуса r основания конуса (аналогично продольной компоненте) скорость деформации возрастает, при этом уменьшение остроты конуса α ведет сначала к росту скорости деформации до значения $\dot{\epsilon}_{yk}, \dot{\epsilon}_{zk} = 0.03$, а дальнейшее уменьшение остроты ведет к уменьшению скорости деформации, причем это проявляется в большей степени при увеличении радиуса основания.

Скорость V_m движения конуса не оказывает существенного влияния на скорость нормальной компоненты деформаций $\dot{\epsilon}_{yk}, \dot{\epsilon}_{zk}$ при наличии выноса острия конуса от рассматриваемого сечения. Вынос острия конуса L_k вперед по оси от точки, в которой анализируется компонента деформации, приводит к существенному увеличению компонент поперечных скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{yk}, \dot{\epsilon}_{zk}$.

Переходя к анализу сдвиговых составляющих скоростей деформаций в продольно-поперечной $\dot{\gamma}_{xyk}$ и продольно-вертикальной $\dot{\gamma}_{xzk}$ плоскостях, следует отметить, что увеличение радиуса основания до $r = 0.03$ м вызывает снижение скоростей этих деформаций в рассматриваемом сечении, дальнейшее же увеличение радиуса основания ведет к возрастанию скоростей этих деформаций.

В то же время, затупление конуса вызывает рост деформаций в продольно-поперечной $\dot{\gamma}_{xyk}$ и продольно-вертикальной $\dot{\gamma}_{xzk}$ плоскостях лишь при больших значениях радиуса основания конуса. Скорости деформаций в продольно-поперечной $\dot{\gamma}_{xyk}$ и продольно-вертикальной $\dot{\gamma}_{xzk}$ плоскостях возрастают как с увеличением скорости V_m перемещения конуса, так и с увеличением выноса L_k острия по отношению к рассматриваемому сечению.

Аналогичная картина характерна для скорости сдвиговой деформации в поперечно-вертикальной плоскости $\dot{\gamma}_{yzk}$. Что касается этой скорости в зависимости от радиуса r основания конуса и от его остроты, которую характеризует величина α , то следует отметить, что существует явно выраженный максимум скорости деформации $\dot{\gamma}_{yzk}$, который зависит от соотношений факторов r и α .

При решении задачи о взаимодействии кротователя с почвой (грунтом) была принята модель грунта в виде вязкоупругой среды, которая может быть формализована моделью Кельвина-Фойгта. Механическая модель такой среды представлена на рисунке 2.6.

Согласно этой модели, вследствие приложения нагрузки, происходит вязкоупругое деформирование материала, при котором с увеличением скорости приложения нагрузки скорость деформации снижается пропорционально коэффициенту вязкости. При выводе уравнений связи напряжений со скоростями деформирования необходимо просуммировать

девиаторные составляющие напряжений упругого и вязкого деформирования.

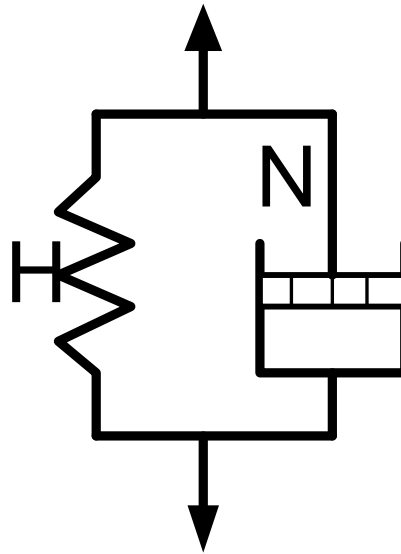


Рис. 2.6 Механическая модель вязкоупругой среды (почвы)

Линейно упругая среда описывается обобщенным законом Гука.

Компоненты девиаторной составляющей закона Гука представляются зависимостями:

$$\sigma_x = 3K\varepsilon + 2G(\varepsilon_x - \varepsilon);$$

$$\sigma_y = 3K\varepsilon + 2G(\varepsilon_y - \varepsilon);$$

$$\sigma_z = 3K\varepsilon + 2G(\varepsilon_z - \varepsilon);$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy}; \tau_{xz} = G\gamma_{xz}; \tau_{yz} = G\gamma_{yz}, \quad (2.4)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненты нормальных и сдвиговых напряжений, K – объемный модуль упругости, $K = E/(3(1-2\nu))$; E – модуль упругости линейных деформаций; G – модуль сдвига, $G = E/(2(1+\nu))$; ν – коэффициент Пуассона; $\varepsilon = 1/3(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$, где

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – компоненты линейных деформаций; $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ – компоненты сдвиговых деформаций.

Зависимости (2.4) могут быть выражены через две упругие постоянные следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E(\varepsilon_x(-1+\nu) - (\varepsilon_y + \varepsilon_z)\nu)}{-1+\nu+2\nu^2}; \\ \sigma_y &= \frac{E(\varepsilon_y(-1+\nu) - (\varepsilon_x + \varepsilon_z)\nu)}{-1+\nu+2\nu^2}; \\ \sigma_z &= \frac{E(\varepsilon_z(-1+\nu) - (\varepsilon_y + \varepsilon_x)\nu)}{-1+\nu+2\nu^2}; \\ \tau_{xy} &= \frac{E\gamma_{xy}}{2(1+\nu)}; \quad \tau_{yz} = \frac{E\gamma_{yz}}{2(1+\nu)}; \quad \tau_{xz} = \frac{E\gamma_{xz}}{2(1+\nu)}.\end{aligned}\tag{2.5}$$

Уравнения (2.4), (2.5) характеризуют поведение упругого элемента модели «Н». Уравнения, которые характеризуют линейную вязкость «N», могут быть выражены зависимостями компонент девиаторных составляющих напряжений со скоростями деформаций такими зависимостями [58]:

$$\sigma_x = 2\mu_0(\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}) + \sigma; \quad \sigma_y = 2\mu_0(\dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}) + \sigma; \quad \sigma_z = 2\mu_0(\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}) + \sigma,\tag{2.6}$$

где μ_0 – коэффициент вязкости объемных деформаций,

$$\mu_0 = \frac{2}{3} \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \mu;$$

μ – коэффициент вязкости сдвиговых деформаций;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{3}(\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z),$$

где $\dot{\varepsilon}_x, \dot{\varepsilon}_y, \dot{\varepsilon}_z$ – компоненты скоростей линейных деформаций.

С учетом введенных обозначений выражения (2.6) приобретут вид:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{2\mu((-7+11\nu)\dot{\varepsilon}_x - (-2+7\nu)(\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_y))}{-9+18\nu}; \\ \sigma_y &= \frac{2\mu((-7+11\nu)\dot{\varepsilon}_y - (-2+7\nu)(\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_x))}{-9+18\nu}; \\ \sigma_z &= \frac{2\mu((-7+11\nu)\dot{\varepsilon}_z - (-2+7\nu)(\dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_x))}{-9+18\nu}; \\ \tau_{xy} &= \mu(\dot{\gamma}_{xy}); \tau_{xz} = \mu(\dot{\gamma}_{xz}); \tau_{yz} = \mu(\dot{\gamma}_{yz}).\end{aligned}\quad (2.7)$$

Для построения общего уравнения вязкоупругой среды должны быть просуммированы составляющие упругой и вязкой частей модели. Суммы компонент напряжений упругой и вязкой составляющих могут быть записаны с учетом того, что компоненты деформаций и скоростей деформаций можно переписать в виде, удобном для понимания, типа уравнений и удобном для решения, уравнений относительно компонент деформаций:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E(\varepsilon_x[t](-1+\nu) - (\varepsilon_y[t] + \varepsilon_z[t])\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} + \\ &+ \frac{2\mu((-7+11\nu)\varepsilon_x'[t] - (-2+7\nu)(\varepsilon_y'[t] + \varepsilon_z'[t]))}{-9+18\nu}; \\ \sigma_y &= \frac{E(\varepsilon_y[t](-1+\nu) - (\varepsilon_x[t] + \varepsilon_z[t])\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} + \\ &+ \frac{2\mu((-7+11\nu)\varepsilon_y'[t] - (-2+7\nu)(\varepsilon_x'[t] + \varepsilon_z'[t]))}{-9+18\nu};\end{aligned}\quad (2.8)$$

$$\sigma_z = \frac{E(\varepsilon_z[t](-1+\nu) - (\varepsilon_x[t] + \varepsilon_z[t])\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} +$$

$$+ \frac{2\mu((-7+11\nu)\varepsilon'_z[t] - (-2+7\nu)(\varepsilon'_x[t] + \varepsilon'_y[t]))}{-9+18\nu};$$

$$\tau_{xy} = \frac{E\gamma_{xy}[t]}{2(1+\nu)} + \mu(\gamma'_{xy}[t]); \quad \tau_{yz} = \frac{E\gamma_{yz}[t]}{2(1+\nu)} + \mu(\gamma'_{yz}[t]);$$

$$\tau_{xz} = \frac{E\gamma_{xz}[t]}{2(1+\nu)} + \mu(\gamma'_{xz}[t]).$$

где $\varepsilon_x[t], \varepsilon_y[t], \varepsilon_z[t], \tau_{xy}[t], \tau_{xz}[t], \tau_{yz}[t]$ – компоненты деформаций, которые зависят от времени, $\varepsilon'_x[t], \varepsilon'_y[t], \varepsilon'_z[t], \gamma'_{xy}[t], \gamma'_{xz}[t], \gamma'_{yz}[t]$ – производные по времени от компонент деформаций.

Решение дифференциальных уравнений (2.8) относительно компонент деформаций имеет вид:

$$\varepsilon_x[t] = \frac{1}{3E} e^{-\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} \left(\begin{array}{l} 3e^{\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) + \\ + e^{\frac{Et}{\mu(1+\nu)}} E(2C_1 - C_2 - C_3) + \\ + E(C_1 + C_2 + C_3) \end{array} \right);$$

$$\varepsilon_y[t] = \frac{1}{3E} e^{-\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} \left(\begin{array}{l} -3e^{\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (-\sigma_y + \nu(\sigma_x + \sigma_z)) - \\ - e^{\frac{Et}{\mu(1+\nu)}} E(C_1 - 2C_2 + C_3) + \\ + E(C_1 + C_2 + C_3) \end{array} \right);$$

$$\varepsilon_z[t] = \frac{1}{3E} e^{-\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} \begin{pmatrix} -3e^{\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (\nu(\sigma_x + \sigma_y) - \sigma_z) - \\ -e^{\frac{Et}{\mu(1+\nu)}} E(C_1 + C_2 - 2C_3) + \\ + E(C_1 + C_2 + C_3) \end{pmatrix}; \quad (2.9)$$

$$\gamma_{xy}[t] = \frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E} + e^{-\frac{Et}{2\mu(1+\nu)}} C_4; \quad \gamma_{yz}[t] = \frac{2(1+\nu)\tau_{yz}}{E} + e^{-\frac{Et}{2\mu(1+\nu)}} C_5;$$

$$\gamma_{xz}[t] = \frac{2(1+\nu)\tau_{xz}}{E} + e^{-\frac{Et}{2\mu(1+\nu)}} C_6,$$

где $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – постоянные интегрирования, которые определяются из условия, что при времени $t = 0$, $\varepsilon_x[t] = \varepsilon_y[t] = \varepsilon_z[t] = 0$, $\gamma_{xy}[t] = \gamma_{xz}[t] = \gamma_{yz}[t] = 0$,

откуда:

$$C_1 = -\frac{\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z}{E}; \quad C_2 = -\frac{-\nu\sigma_x + \sigma_y - \nu\sigma_z}{E};$$

$$C_3 = -\frac{-\nu\sigma_x - \nu\sigma_y + \sigma_z}{E}; \quad C_4 = -\frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E};$$

$$C_5 = -\frac{2(1+\nu)\tau_{yz}}{E}; \quad C_6 = -\frac{2(1+\nu)\tau_{xz}}{E}.$$

После подстановки постоянных интегрирования в уравнения (2.9), значения компонент вязкоупругих деформаций будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_x &= \frac{e^{-\frac{3Gt}{2\eta(1+\nu)}} (e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) - 3(-1+2\nu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z))}{12\eta(1+\nu)^2}; \\ \dot{\epsilon}_y &= \frac{e^{-\frac{3Gt}{2\eta(1+\nu)}} (-e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\sigma_x - 2\sigma_y + \sigma_z) - 3(-1+2\nu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z))}{12\eta(1+\nu)^2}; \\ \dot{\epsilon}_z &= \frac{e^{-\frac{3Gt}{2\eta(1+\nu)}} (-e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\sigma_x + \sigma_y - 2\sigma_z) - 3(-1+2\nu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z))}{12\eta(1+\nu)^2}; \\ \dot{\gamma}_{xy} &= \frac{e^{-\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \tau_{xy}}{2\eta(1+\nu)}; \dot{\gamma}_{yz} = \frac{e^{-\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \tau_{yz}}{2\eta(1+\nu)}; \dot{\gamma}_{xz} = \frac{e^{-\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \tau_{xz}}{2\eta(1+\nu)}.\end{aligned}$$

Из последних зависимостей компоненты напряжений выразятся следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (6\dot{\epsilon}_x - 3(\dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu}); \\ \sigma_y &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (-3(\dot{\epsilon}_x - 2\dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu}); \\ \sigma_z &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (-3(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y - 2\dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu}); \\ \tau_{xy} &= 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \dot{\gamma}_{xy}, \\ \tau_{yz} &= 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \dot{\gamma}_{yz}, \\ \tau_{xz} &= 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \dot{\gamma}_{xz}.\end{aligned}\tag{2.10}$$

Время деформирования t , которое входит в зависимости связи напряжений со скоростями деформаций, может быть определено по времени распространения волны напряжений. Скорость распространения волны напряжений [5]: $c = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$, где λ – коэффициент Ляме,

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}, \text{ где } \lambda \text{ – коэффициент Ляме,}$$

$$\lambda = k - 2/3G; \quad k = 2/3((1+\nu)/(1-2\nu))G.$$

Время распространения волны:

$$t = \frac{l}{c} = l / \sqrt{\frac{E(-1+\nu)}{(-1+\nu+2\nu^2)\rho}} = \sqrt{2}l / \sqrt{\frac{G(-1+\nu)}{(1+\nu)^2(-1+2\nu)\rho}}, \quad (2.11)$$

где l – расстояние, на котором затухает волна напряжений в данной среде.

Таким образом, уравнения (2.10) вместе с (2.11) определяют компоненты напряжений вязкоупругой среды, в виде которой представлена почва (грунт).

Для определения динамических характеристик контактного взаимодействия конусного рабочего органа с почвой (грунтом) необходимо воспользоваться полученными выше физическими уравнениями связи компонент напряжений с компонентами скоростей деформаций. С учетом ранее определенных [137] компонент скоростей деформаций по уравнениям (2.10) определяются компоненты напряжений на поверхности контакта рабочий орган – почва. В развернутом виде эти выражения имеют еще более громоздкий, нежели компоненты скоростей деформаций, вид, поэтому привести их полностью в пределах монографии не представляется возможным.

Под воздействием изменения напряженно-деформированного состояния почвы (грунта) на границе контакта с рабочим органом происходят изменения плотности самой почвы (грунта). Наиболее известными

регрессионными зависимостями, которые связывают изменения плотности почвы с изменением напряжений, являются выражения [75, 77]:

$$BVW = m \ln \left[\sqrt{\sigma_m^2 + \tau_{\max}^2} \right] + n \left(\frac{\tau_{\max}}{\sigma_m} \right) + b; \quad (2.12)$$

$$\rho_k = \rho_0 + b \ln[\sigma_m (1 + \tau_{\max})],$$

где BVW – изменение объема почвы, отнесенного к массе $[м^3/кг]$, ρ_k – конечная плотность почвы $[кг/м^3]$, ρ_0 – начальная плотность почвы, σ_m – среднее или гидростатическое напряжение в рассматриваемом объеме, τ_{\max} – максимальное касательное напряжение в рассматриваемом объеме, m, n, b – эмпирические коэффициенты, которые характерны для определенного типа почвы при различных влажностях и подлежат экспериментальному определению.

Величина гидростатического напряжения определяется как: $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_z + \sigma_y)/3$, а величина максимального касательного напряжения для прикладных решений, согласно результатам исследований Новожилова [96], может быть представлена среднеквадратическим компонент касательных напряжений в виде: $\tau_{\max} = \sqrt{(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}/3$.

Используя второе из выражений (2.12) и учитывая то, что для конкретной почвы при определенном ее состоянии величина $b = const$, с использованием вышеизложенных результатов можно построить зависимости изменения плотности почвы от ее механических свойств, геометрических параметров кротователя и скорости его движения. Сами зависимости в конечном виде не могут быть приведены в пределах монографии, а графическая интерпретация этих зависимостей представлена на рисунке 2.7.

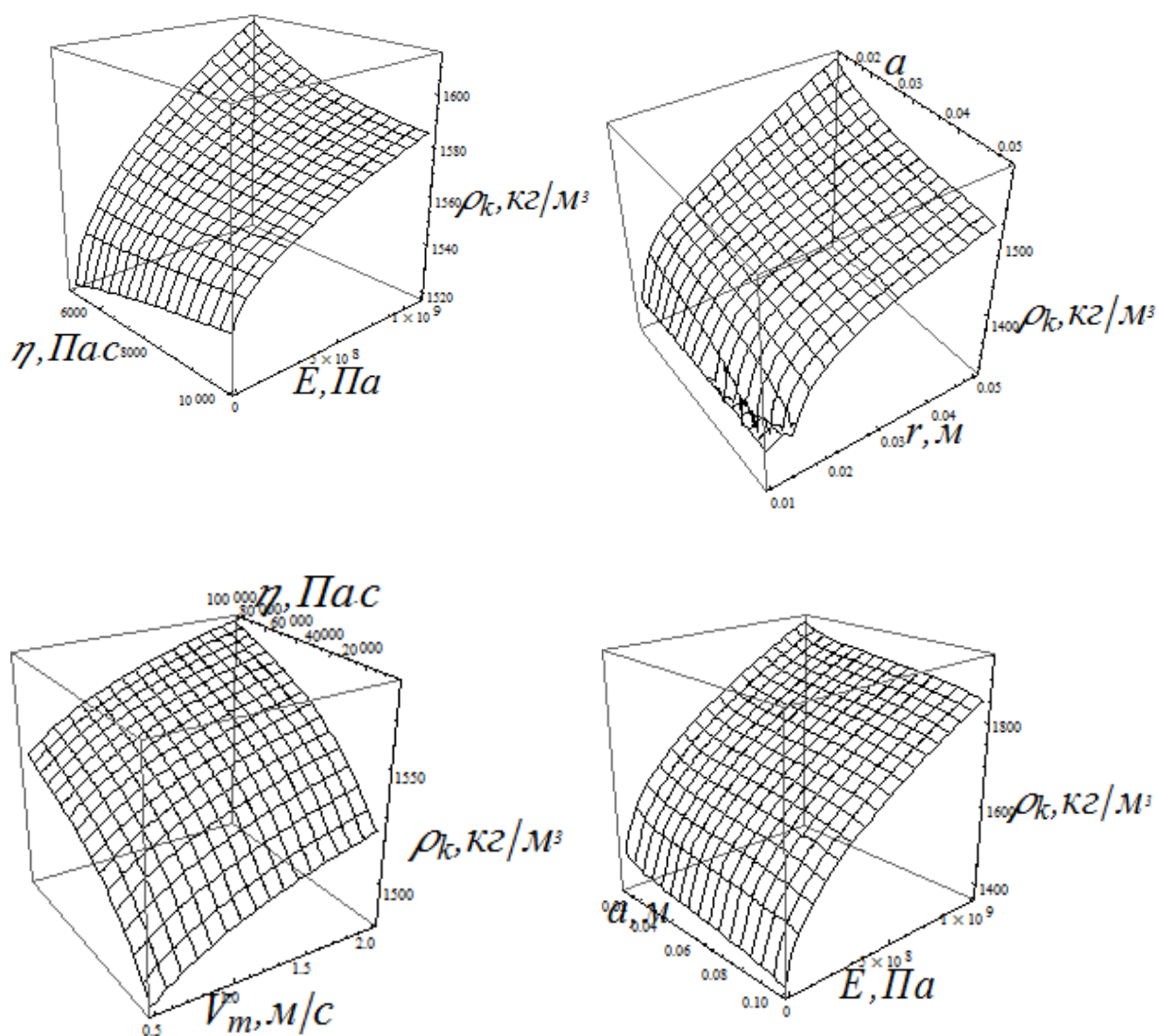


Рис. 2.7 Характерные графики изменений плотности почвы (грунта) ρ_k в зависимости от модулей вязкости η и упругости E почвы, радиуса r основания конуса, коэффициента, характеризующего его остроту a , и скорости его перемещения V_m

Анализ изменений плотности почвы (грунта) ρ_k от действия кротователя свидетельствует о том, что с увеличением радиуса r основания конуса плотность возрастает нелинейно, причем интенсивность этого возрастания увеличивается с уменьшением остроты конуса кротователя.

Увеличение модулей упругости E и вязкости η почвы приводит к возрастанию плотности, причем рост модуля вязкости ведет к менее интенсивному возрастанию плотности почвы. Аналогичная картина наблюдается с ростом радиуса r основания конуса и уменьшением его остроты α (интенсивный рост с увеличением радиуса и уменьшением остроты в начальной части). Как и следовало ожидать, плотность почвы возрастает с ростом скорости V_m перемещения кротователя, причем эта интенсивность сохраняется постоянной для широкого диапазона значений модуля вязкости η .

Распределения компонент давлений почвы (грунта) на поверхность конусного кротователя могут быть определены из условий равновесия на поверхности:

$$\begin{aligned} dF_x &= \sigma_x l_k + \tau_{xy} m_k + \tau_{xz} n_k; \\ dF_y &= \sigma_y m_k + \tau_{xy} l_k + \tau_{yz} n_k; \\ dF_z &= \sigma_z n_k + \tau_{xz} l_k + \tau_{yz} m_k, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где dF_x, dF_y, dF_z – проекции на соответствующие оси координат компонент давлений почвы на поверхность кротователя, l_k, m_k, n_k – направляющие косинусы нормали к поверхности рабочего органа [137].

Интегрирование выражений (2.13) по проекциям, перпендикулярным соответствующим индексам компонент давлений, дает величины сил сопротивления движению кротователя в почве (грунте):

$$F_x = \int_{-r-r}^r \int_{-r-r}^r dF_x d\eta d\zeta; F_y = \int_{-rL_k}^r \int_{-rL_k}^0 dF_y d\xi d\zeta; dF_z = \int_{-rL_k}^r \int_{-rL_k}^0 dF_z d\xi d\eta. \quad (2.14)$$

Зависимости (2.14) в конечном виде не могут быть приведены вследствие их громоздкости, а их графическая интерпретация представлена на рисунках 2.8 - 2.9.

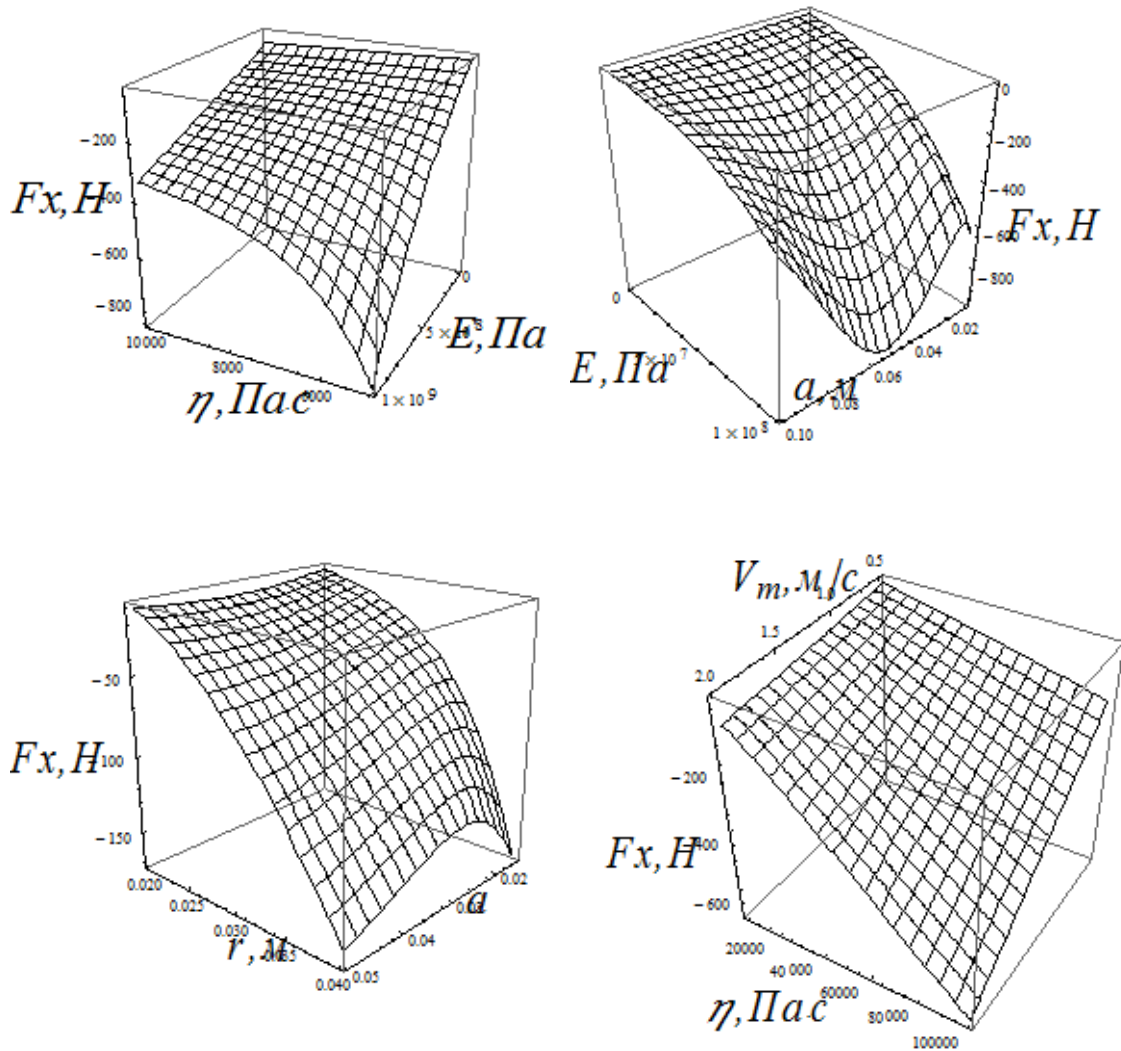


Рис. 2.8 Характерные графики изменений продольно горизонтальной F_x составляющей сопротивления движению кротователя в почве (грунте) в зависимости от модулей вязкости η и упругости E почвы, радиуса r основания конуса, коэффициента, характеризующего его остроту α , и скорости его перемещения V_m .

Суммарное сопротивление перемещению конусной части рабочего органа в почве состоит из составляющей сопротивления почвы F_x и сил трения по поверхности конуса, спроектированных на направление движения. Тогда общая сила сопротивления движению выразится следующим образом:

$$F_{xtk} = F_x - \left(\sqrt{(F_y m_k)^2 + (F_z n_k)^2} \right) \operatorname{tg} \psi, \quad (2.14.a)$$

где ψ – угол трения почвы по материалу поверхности конуса (рис. 2.10).

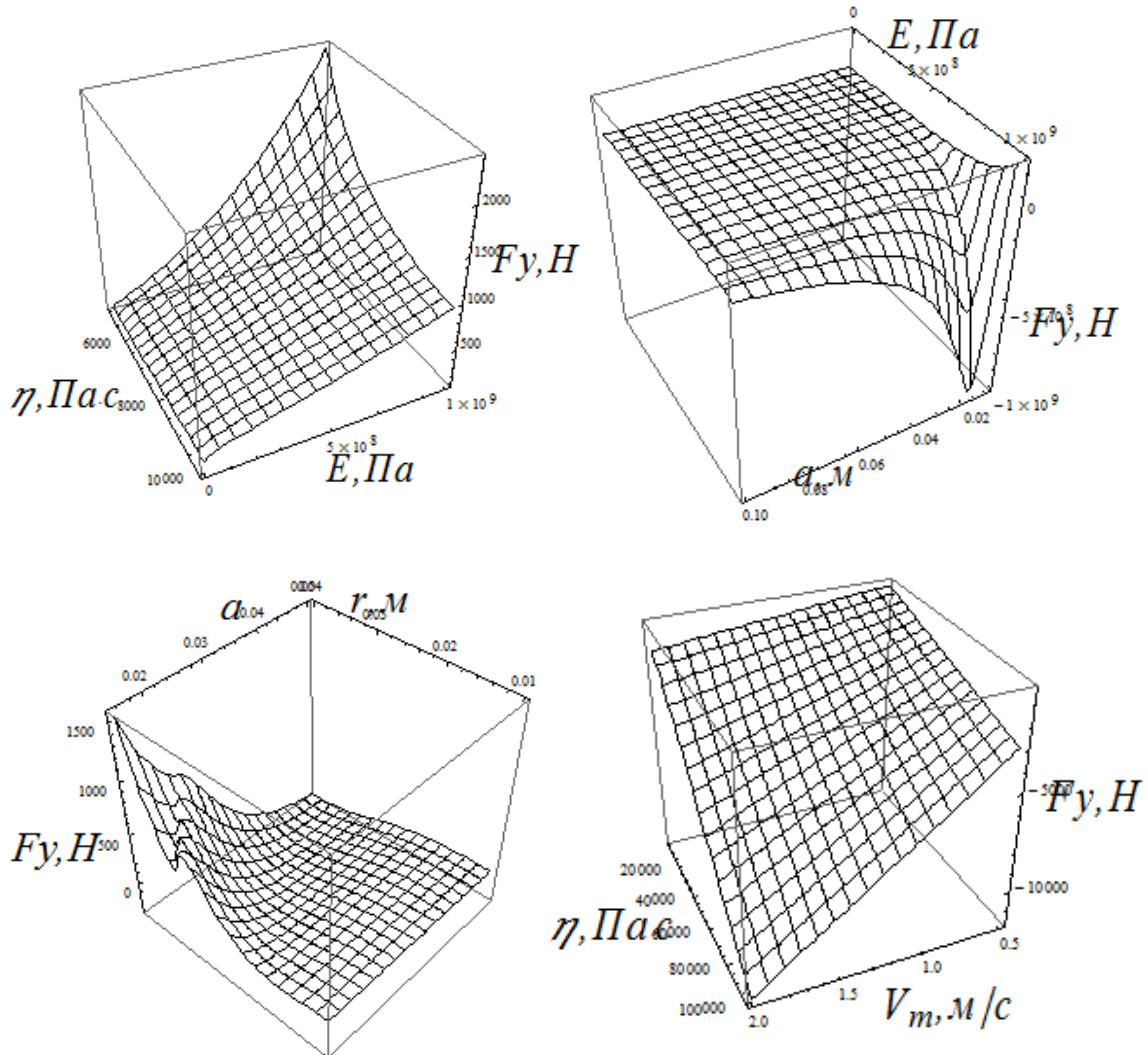


Рис. 2.9 Характерные графики изменений поперечно горизонтальной F_y составляющей сопротивления движению кротователя в почве (грунте) в зависимости от модулей вязкости η и упругости E почвы, радиуса r основания конуса, коэффициента, характеризующего его остроту a , и скорости его перемещения V_m .

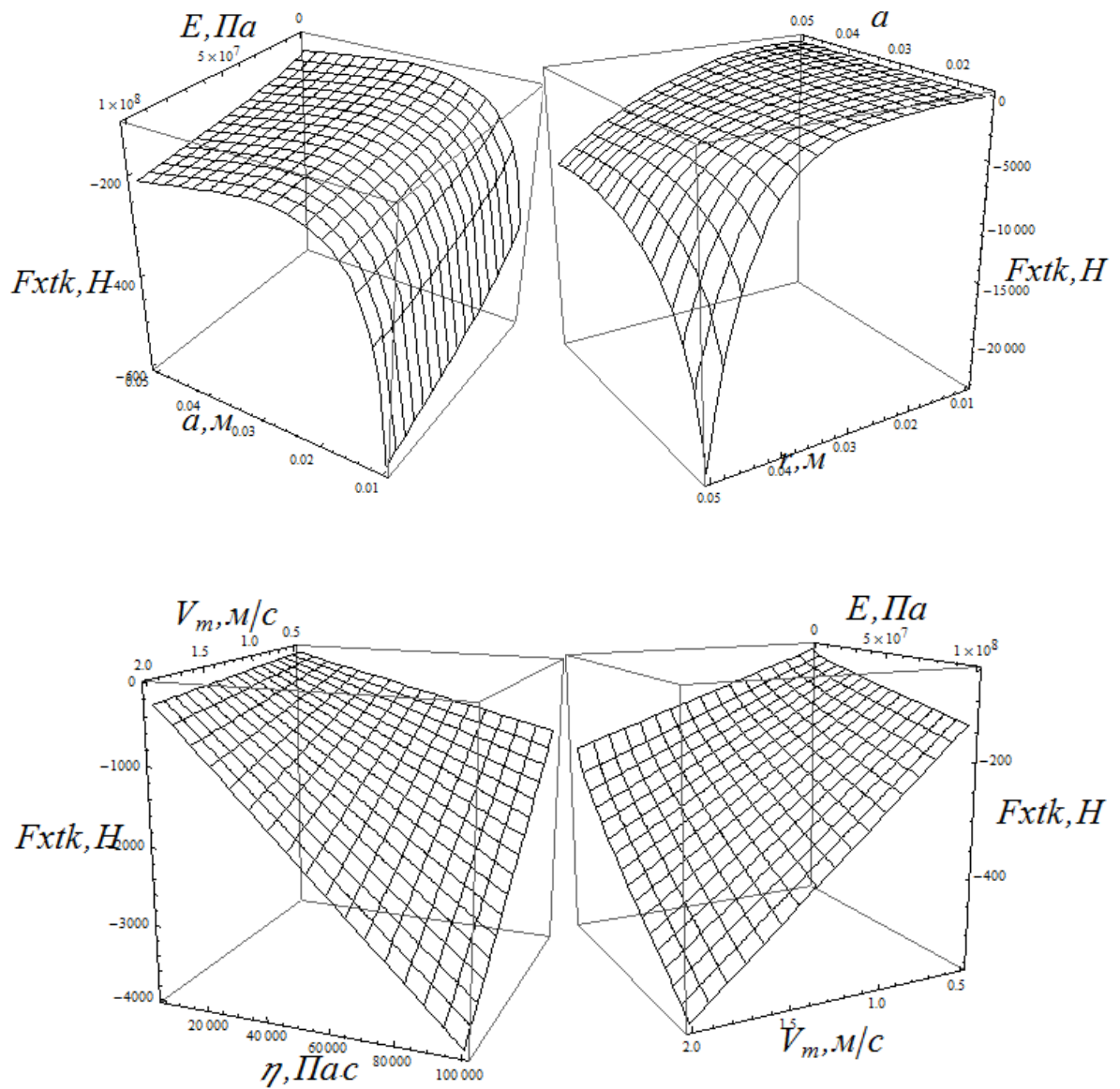


Рис. 2.10 Характерные графики изменений суммарной силы сопротивления F_{xtk} движению кротователя в почве (грунте) в зависимости от модулей вязкости η и упругости E почвы, радиуса r основания конуса, коэффициента, характеризующего его остроту a , и скорости его перемещения V_m .

Следует отметить, что поперечно горизонтальная F_y и вертикально горизонтальная F_z составляющие сопротивления движению кротователя являются суммами по модулю сил, действующих в положительном и отрицательном направлениях по осям Oy и Oz , соответственно.

Вследствие симметрии конуса относительно оси $O\xi$, составляющая силы сопротивления движению F_z имеет характер, аналогичный F_y .

Анализ продольно горизонтальной F_x составляющей сопротивления движению кротователя в почве (грунте) свидетельствует о том, что с увеличением радиуса r основания конуса усилие сопротивления возрастает нелинейно, причем интенсивность этого возрастания увеличивается с уменьшением остроты конуса кротователя. Увеличение модулей упругости E и вязкости η почвы приводит к возрастанию сопротивления движению кротователя, причем рост модуля вязкости ведет к более интенсивному возрастанию сопротивления при начальном увеличении вязкости до величины $\eta \leq 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}$, после чего дальнейший рост вязкости не приводит к существенному росту сил сопротивления. Аналогичная картина наблюдается с ростом радиуса r основания конуса и уменьшением его остроты α (интенсивный рост с увеличением радиуса и уменьшением остроты в начальной части). Как и следовало ожидать, сопротивление F_x возрастает с ростом скорости перемещения кротователя, причем эта интенсивность выше для больших значений модуля вязкости η .

Что касается сил сопротивления движению F_y , и, аналогично, F_z , – то увеличение модулей упругости E и вязкости η приводит к увеличению данных компонент сил сопротивления, причем более интенсивный рост сопротивлений наблюдается при меньших значениях модуля вязкости η , в то время как рост модуля упругости E ведет к равномерному пропорциональному увеличению сил сопротивления F_y и F_z .

Величины сил сопротивления F_y и F_z увеличиваются с уменьшением остроты конуса a , причем более интенсивно эти величины растут при меньших значениях радиуса r основания конуса.

Составляющие сопротивления F_y и F_z возрастают с ростом скорости перемещения кротователя V_m , причем эта интенсивность возрастания выше для меньших значений модуля вязкости η .

Анализ зависимости суммарной силы сопротивления грунта передвижению конусной рабочей части свидетельствует о том, что увеличение модуля упругости E и модуля вязкости грунта η приводит к росту сил сопротивления, что вполне закономерно. С увеличением радиуса основания конуса r и уменьшением остроты конуса a силы сопротивления растут.

Таким образом, в результате проведенного анализа получены компоненты скоростей относительных деформаций почвы (грунта) на поверхности контакта с конусным кротователем. Эти выражения являются исходными для дальнейшего определения компонент напряжений в почве (грунте), которые позволяют определить уплотнение почвы (грунта) на стенках образованной кротовины и составляющие сил сопротивления перемещению кротователя.

На основании проведенного анализа динамики контактного взаимодействия кротователя с почвой установлены компоненты нормальных и сдвиговых напряжений почвы на поверхности контакта. Определены направления и величины уплотнения почвы в зависимости от механических свойств почвы, геометрических параметров кротователя и скорости его поступательного перемещения. Определены составляющие сил сопротивления почвы движению кротователя в почве в зависимости от геометрических параметров и скорости его поступательного перемещения, а также механических свойств почвы.

Анализируя зависимости уплотнения почвы стенок образованной кротовины и сопротивление почвы (грунта) передвижению рабочего органа, можно прийти к выводу, что для большинства почв (грунтов) по механическим характеристикам наиболее рациональными будут следующие геометрические параметры конусной части рабочего органа: заострение $a \approx 0.02$, радиус основания конуса $r \approx 1.1r_t$, где r_t – радиус трубы оросителя, при скорости движения $V_m \approx 1 м / с$.

2.4 Анализ уплотнения почвы лемешной частью рабочего органа для образования кротовин

Анализ последних исследований и публикаций [3, 15, 34, 43, 64, 75, 77] показывает, что для решения данной задачи необходима формализация почвы, как среды, на которую направлено действие рабочего органа, а также формализация взаимодействия самого рабочего органа с почвой. Чаще всего используются модели, больше напоминающие взаимодействие с абсолютно твердым телом, или модели, используемые в классической теории механики грунтов, которые основаны на механике сыпучих сред [130].

Кроме того, при построении моделей взаимодействия используются либо одномерные модели, либо в лучшем случае плоские решения, которые не всегда отображают реальный процесс изменений свойств почвы (грунта) под действием рабочего органа [75, 77].

При этом следует отметить, что плотность почвы под воздействием рабочего органа изменяется в функции изменения всех шести компонент деформаций или напряжений, что не может быть отображено в плоской постановке задачи, а тем более – в одномерной. Кроме того, такие постановки задачи не позволяют определить все три составляющие сопротивления движению рабочего органа в почве. Поэтому решение задачи о взаимодействии рабочего органа с почвой в трехмерной постановке с установлением взаимосвязи геометрических параметров и режимов работы

самого рабочего органа и изменением свойств почвы, а также компонент тягового сопротивления является актуальной задачей, которая требует решения.

В связи с этим необходимо дальнейшее определение скоростей относительных деформаций в зоне контакта лемешного рабочего органа с почвой в зависимости от его геометрических и кинематических параметров.

Для образования полости, в которой должен быть уложен экран методом протяжки, может быть использован лемешный рабочий орган, схема движения которого представлена на рисунке 2.11.

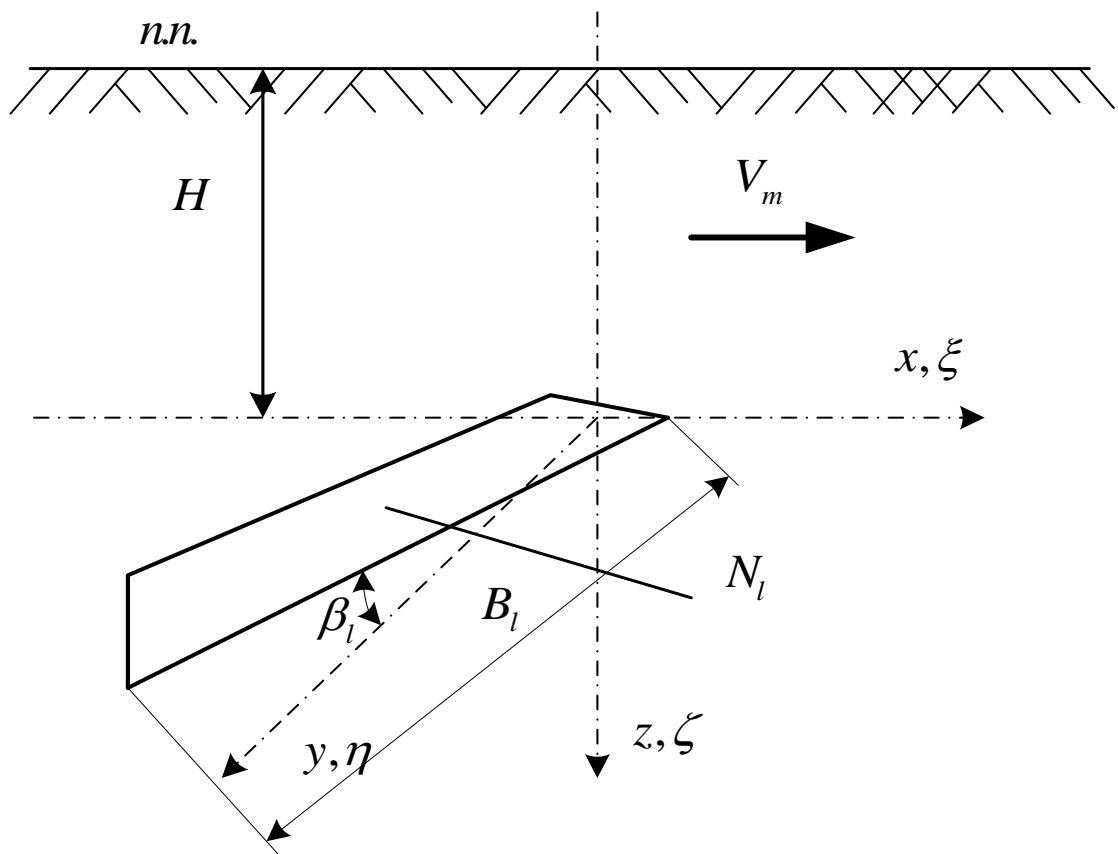


Рис. 2.11 Схема движения лемеха

Метод построения решения относительно уплотнения стенок полости аналогичен рассмотренному выше методу для конусного кротователя [137].

Уравнение рабочей части поверхности лемеха в системе координат $\xi\eta\zeta$ idem xuz имеет вид уравнения плоскости:

$$f_l = \frac{\xi}{a} + \frac{r - \eta}{b} + \frac{(r/2) - \zeta}{c} = 0,$$

где a, b, c – коэффициенты, определяющие наклон плоскости к соответствующим осям координат $o\xi, o\eta, o\zeta$,

r – радиус основания конусного кротователя. Введение последнего в уравнение определяет смещения центра плоскости к началу координат в направлении оси $o\zeta$.

Косинусы углов наклона нормали к поверхности к осям координат выразятся зависимостями:

$$l_l = \frac{\partial f_l / \partial \xi}{\sqrt{(\partial f_l / \partial \xi)^2 + (\partial f_l / \partial \eta)^2 + (\partial f_l / \partial \zeta)^2}} = 1 / \left(a \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}} \right);$$

$$m_l = \frac{\partial f_l / \partial \eta}{\sqrt{(\partial f_l / \partial \xi)^2 + (\partial f_l / \partial \eta)^2 + (\partial f_l / \partial \zeta)^2}} = -1 / \left(b \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}} \right);$$

$$n_l = \frac{\partial f_l / \partial \zeta}{\sqrt{(\partial f_l / \partial \xi)^2 + (\partial f_l / \partial \eta)^2 + (\partial f_l / \partial \zeta)^2}} = -1 / \left(\sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}} c \right).$$

Скорости перемещений почвы на поверхности лемеха определяются аналогично тому, как это производилось для конусного кротователя [137], на основании того, что проекция скорости на нормаль к поверхности лемеха имеет вид $V_{Nl} = V_m / l_l$:

$$v_{l0} = V_{nl} m_l = -aV_m / b; w_{l0} = V_{nl} n_l = -aV_m / c; u_{l0} = V_{nl} l_l = V_m.$$

Аналитические решения для контактных задач возможны только в упругой или упруго-вязкой постановке. Причем эти решения допускаются лишь для случая, когда при последовательных подстановках геометрических уравнений в физические уравнения связи напряжений с деформациями

дальнейшая подстановка полученных компонент напряжений в уравнения статики (динамики) сплошной среды приведет к получению уравнений эллиптического типа. В таком случае решение может быть найдено при использовании бигармонических потенциальных функций, которые удовлетворяют условиям на поверхности контакта тела (система координат ξ, η, ζ) и среды, с которой оно взаимодействует (система координат x, y, z),

т.е. при $x - \xi = 0, y - \eta = 0, z - \zeta = 0$ компоненты скоростей (перемещений) равны их начальным значениям. Для нашего случая это означает, что компоненты скоростей для конуса имеют вид:

$$u_l \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} = u_{l0}, \quad v_l \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} = v_{l0}, \quad w_l \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} = w_{l0}.$$

Второе условие, которому должны удовлетворять бигармонические потенциальные функции для определения компонент скоростей, имеет вид:

$$u_l \Big|_{x-\xi=\infty, y-\eta=\infty, z-\zeta=\infty} \rightarrow 0, \quad v_l \Big|_{x-\xi=\infty, y-\eta=\infty, z-\zeta=\infty} \rightarrow 0, \quad w_l \Big|_{x-\xi=\infty, y-\eta=\infty, z-\zeta=\infty} \rightarrow 0.$$

Такие бигармонические потенциальные функции, согласно А. И. Лурье [82], имеют вид:

$$\begin{aligned} u_l &= \iint_{r-r}^{B-r} \frac{a_0 u_{l0} (x - \xi_l + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\zeta_l d\eta_l; \\ v_k &= \iint_{-r-0}^{r-L_k} \frac{a_0 v_{l0} (y - \eta_k + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_l d\zeta_l; \\ w_l &= \iint_{r-0}^{BL_l} \frac{a_0 w_{l0} (z - \zeta_l + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_l d\eta_l, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где $L_l = -B \text{Cos}(1/a)$ – проекция длины лемеха в направлении оси $o\xi$,

B – проекция длины лемеха в направлении оси $o\eta$,

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \frac{4}{\text{Log}[-\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}] - \text{Log}[\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}]} \quad \text{– коэффициент,}$$

обеспечивающий выполнение начальных условий при введении малой величины δ , которая устраняет сингулярность выражений (2.15).

Бигармонические потенциальные функции должны удовлетворяют уравнению $\Delta^2 f = 0$, где Δ – оператор Лапласа, $f = \{u_l, v_l, w_l\}$.

В связи со сложностью интегрирования уравнений (2.15), которые представляют собой компоненты скоростей перемещений почвы (грунта) в пространстве перед рабочим органом, в общем виде можно решать задачу о нахождении распространения скоростей перемещений, скоростей относительных деформаций, компонент напряжений в дифференциальном виде, как это было предложено в [64, 137]. Суть метода состоит в том, что для нахождения компонент скоростей деформаций предполагается дифференцирование уравнений (2.15), согласно геометрических уравнений (уравнений Коши) теории сплошных сред.

Для этого можно преобразовать уравнения (2.15) таким образом, что в результате будут получены компоненты дифференциальных составляющих компонент скоростей смещений почвы (грунта) перед рабочим органом:

$$\begin{aligned}
 du_l &= \frac{d^2}{d\eta_l d\zeta_l} \int_0^B \int_{-r}^r \frac{a_0 u_{l0}(x - \xi_l + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\zeta_l d\eta_l = \\
 &= \frac{15a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)(y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{7/2}}; \\
 dv_l &= \frac{d^2}{d\zeta_l d\xi_l} \int_{-r}^r \int_0^{L_l} \frac{a_0 v_{l0}(y - \eta_k + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_l d\zeta_l = \\
 &= -\frac{15a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)(y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{b((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{7/2}}; \\
 dw_l &= \frac{d^2}{d\eta_l d\zeta_l} \int_r^{BL_l} \int_0^{L_l} \frac{a_0 w_{l0}(z - \zeta_l + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_l d\eta_l = \\
 &= -\frac{15a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)(y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{c((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{7/2}}.
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Из уравнений (2.16) можно получить дифференциальные компоненты скоростей деформаций почвы (грунта), используя геометрические уравнения (уравнения Коши):

$$\begin{aligned}
d\dot{\epsilon}_{xl} &= \frac{d}{dx} du_l = \\
&= \frac{15a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)(y + \delta - \eta_l)((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 - 6(x + \delta - \xi_l)^2)}{((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{9/2}}; \\
d\dot{\epsilon}_{yl} &= \frac{d}{dy} dv_k = \frac{105a a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)^2 (y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{c((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{9/2}} - \\
&\quad - \frac{15a a_0 V_m (y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{c((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{7/2}}; \\
d\dot{\epsilon}_{zl} &= \frac{d}{dz} dw_l = 15a_0 V_m (\delta - \zeta_l + z) \times \\
&\quad \times \left(\frac{7a(\delta - \xi_l + x)^2 (\delta - \eta_l + y)}{b} - \frac{a(\delta - \eta_l + y)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{b} - \right. \\
&\quad \left. \frac{-7(\delta - \xi_l + x)(\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \xi_l + x)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)^{9/2}} \right); \\
d\dot{\gamma}_{xyl} &= \frac{d}{dy} du_l + \frac{d}{dx} dv_l = 15a_0 V_m (\delta - \zeta_l + z) \times \\
&\quad \times \left(\frac{7a(\delta - \xi_l + x)^2 (\delta - \eta_l + y)}{b} - \frac{a(\delta - \eta_l + y)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{b} - \right. \\
&\quad \left. \frac{-7(\delta - \xi_l + x)(\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \xi_l + x)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)^{9/2}} \right); \\
d\dot{\gamma}_{xzl} &= \frac{d}{dz} du_l + \frac{d}{dx} dw_l = 15a_0 V_m (\delta - \eta_l + y) \times \\
&\quad \times \left(-\frac{a(\delta - \zeta_l + z)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{c} + \frac{7a(\delta - \xi_l + x)^2 (\delta - \zeta_l + z)}{c} + \right. \\
&\quad \left. \frac{+(\delta - \xi_l + x)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2) - 7(\delta - \xi_l + x)(\delta - \zeta_l + z)^2}{((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)^{9/2}} \right);
\end{aligned}
\tag{2.17}$$

где $d\dot{\epsilon}_{xl}, d\dot{\epsilon}_{yl}, d\dot{\epsilon}_{zl}, d\dot{\gamma}_{xyl}, d\dot{\gamma}_{xzl}, d\dot{\gamma}_{yzl}$ – компоненты дифференциальных составляющих скоростей относительных нормальных и сдвиговых деформаций почвы перед лемехом.

Для понимания характера воздействия рабочего органа в зоне непосредственного контакта с почвой (грунтом), а именно его геометрических форм и размеров, на изменения компонент относительных деформаций выражения (2.17) можно проинтегрировать, согласно выражениям (2.15). При этом следует учитывать то, что анализу подлежит зона непосредственного контакта, а именно условия: $\{\zeta_l - z = 0, \eta_l - y = 0, \xi_l - x = 0\}$. Это существенно упрощает выражения (2.17). К сожалению, в развернутом виде привести конечные выражения компонент скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{xl}, \dot{\epsilon}_{yl}, \dot{\epsilon}_{zl}, \dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yzl}$, не представляется возможным из-за громоздкости конечных выражений. Графическая интерпретация этих выражений представлена на рисунках 2.12 – 2.13.

Анализ показал, что влияние коэффициентов уравнения плоскости a, b, c на изменение нормальных компонент (рис. 2.12) скоростей деформаций характеризуется следующими изменениями: уменьшение угла наклона a поверхности к продольной в отношении направлению движения оси ведет к возрастанию скоростей нормальных деформаций $\dot{\epsilon}_{xl}, \dot{\epsilon}_{zl}$ (сжатие) и уменьшению поперечной к направлению движения нормальной скорости деформации $\dot{\epsilon}_{yl}$; изменение наклона нормали к плоскости к оси ou , поперечной направлению движения b , ведет к уменьшению компонент скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{xl}, \dot{\epsilon}_{yl}$ и при очень малых его значениях – к уменьшению составляющей $\dot{\epsilon}_{zl}$; с увеличением наклона нормали к плоскости к оси oz (величина c) уменьшаются компоненты скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{xl}, \dot{\epsilon}_{zl}$, а компонента $\dot{\epsilon}_{yl}$ остается неизменной.

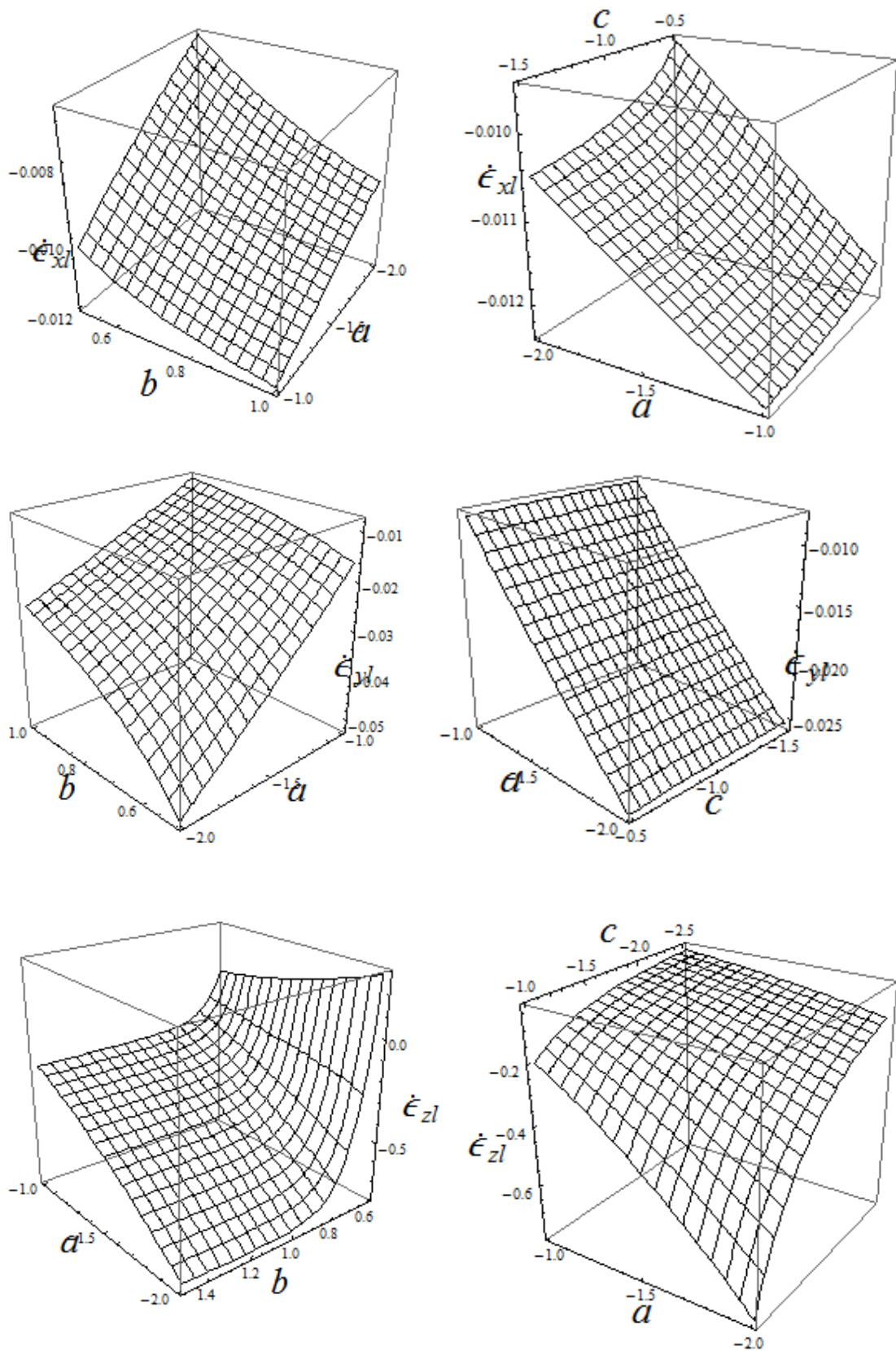


Рис. 2.12 Графики нормальных компонент скоростей относительных нормальных деформаций почвы $\dot{\epsilon}_{xl}, \dot{\epsilon}_{yl}, \dot{\epsilon}_{zl}$ в зависимости от коэффициентов a, b, c уравнения плоскости

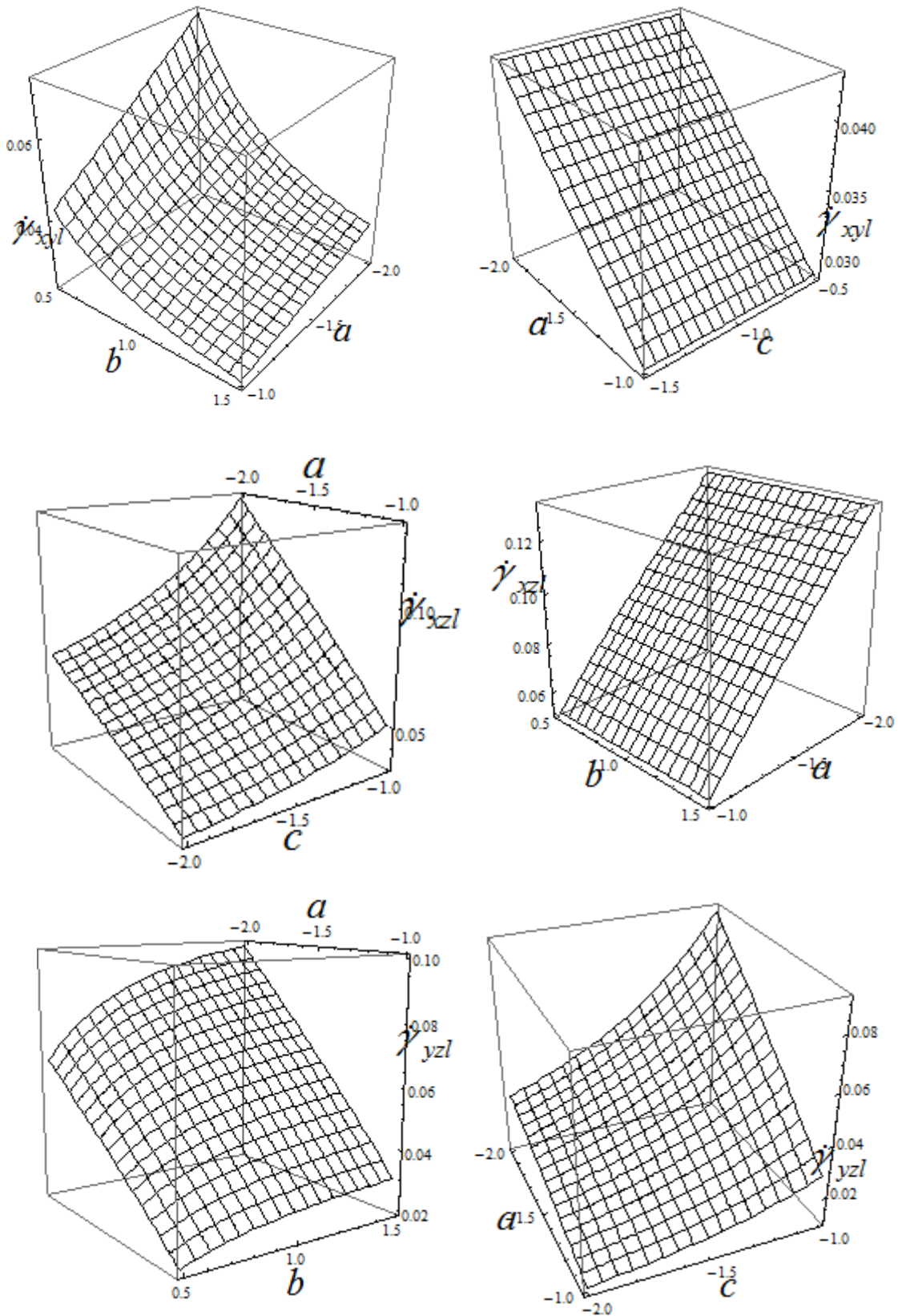


Рис. 2.13 Графики касательных (сдвиговых) компонент скоростей относительных деформаций почвы $\dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yxl}$ в зависимости от коэффициентов a, b, c уравнения плоскости

Следует отметить, что уменьшение угла наклона нормали к плоскости a ведет к уменьшению всех трех компонент скоростей сдвиговых деформаций $\dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yzl}$; увеличение угла наклона нормали к плоскости c – к уменьшению $\dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yzl}$, при этом $\dot{\gamma}_{xyl}$ остается неизменным. Уменьшение величины b приводит к увеличению компонент $\dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{yzl}$ и не влияет на изменение $\dot{\gamma}_{xzl}$ (рис. 2.13).

В соответствии с принятой моделью связи напряжений со скоростями деформаций для почвы [138], определяются компоненты напряжений $\sigma_{xl}, \sigma_{yl}, \sigma_{zl}, \tau_{xyl}, \tau_{xzl}, \tau_{yzl}$ в почве на поверхности контакта лемеха с почвой, при этом компоненты скоростей деформаций на поверхности контакта составляют $\dot{\epsilon}_{xl}, \dot{\epsilon}_{yl}, \dot{\epsilon}_{zl}, \dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yzl}$:

$$\begin{aligned}\sigma_{xl} &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (6\dot{\epsilon}_{xl} - 3(\dot{\epsilon}_{yl} + \dot{\epsilon}_{zl}) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu) (\dot{\epsilon}_{xl} + \dot{\epsilon}_{yl} + \dot{\epsilon}_{zl})}{-1+2\nu}); \\ \sigma_{yl} &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (-3(\dot{\epsilon}_{xl} - 2\dot{\epsilon}_{yl} + \dot{\epsilon}_{zl}) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu) (\dot{\epsilon}_{xl} + \dot{\epsilon}_{yl} + \dot{\epsilon}_{zl})}{-1+2\nu}); \\ \sigma_{zl} &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (-3(\dot{\epsilon}_{xl} + \dot{\epsilon}_{yl} - 2\dot{\epsilon}_{zl}) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu) (\dot{\epsilon}_{xl} + \dot{\epsilon}_{yl} + \dot{\epsilon}_{zl})}{-1+2\nu});\end{aligned}\tag{2.18}$$

$$\tau_{xyl} = 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \dot{\gamma}_{xyl}, \tau_{yzl} = 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \dot{\gamma}_{yzl}, \tau_{xzl} = 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \dot{\gamma}_{xzl},$$

где $G = E/(2(1+\nu))$ – модуль упругости сдвиговых деформаций, η – коэффициент вязкости сдвиговых деформаций, E – модуль упругости линейных деформаций, G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона.

Из-за громоздкости полученных выражений, в работе они не приводятся, а графическая интерпретация компонент напряжений приведена на рисунках 2.14 и 2.15.

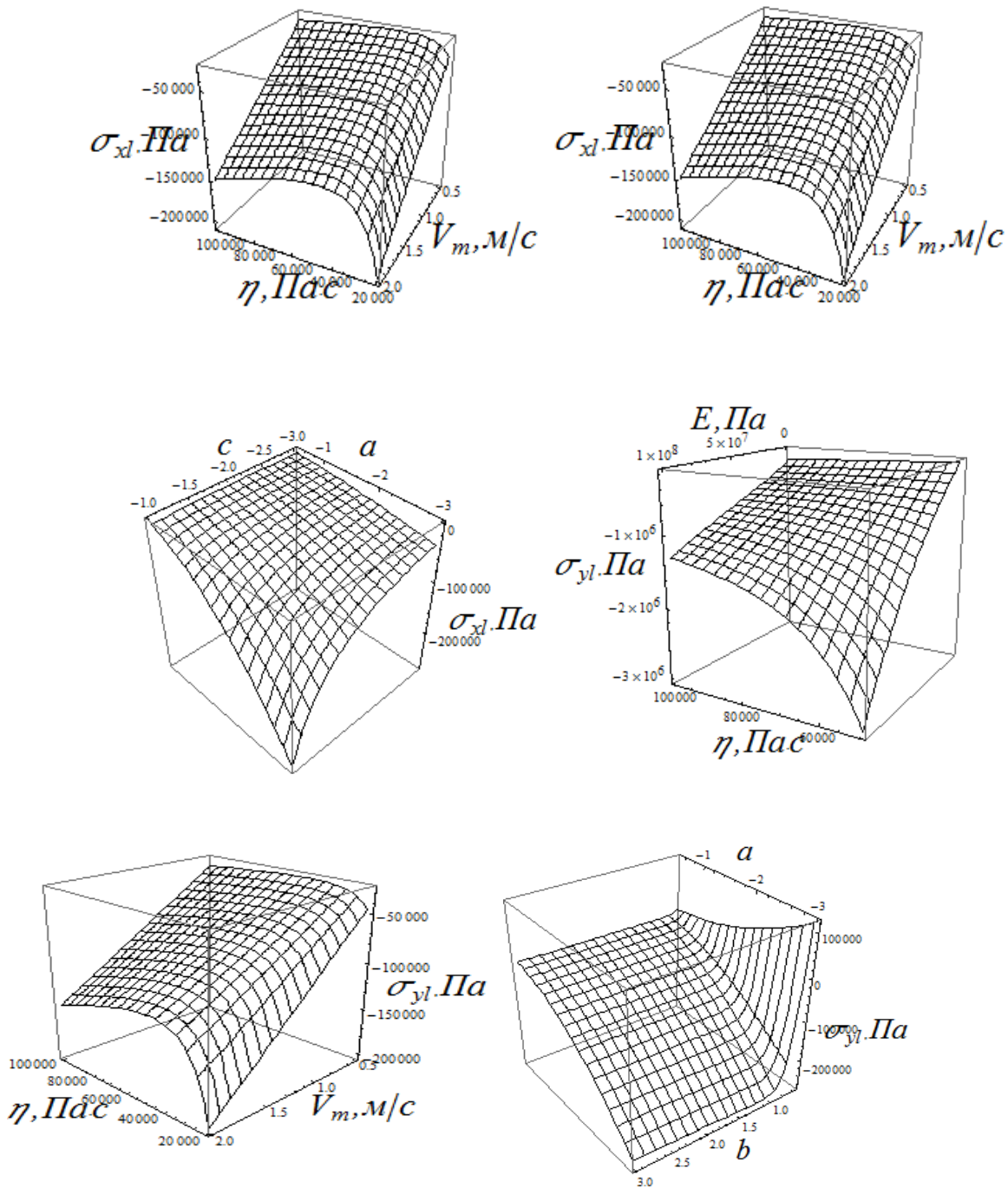


Рис. 2.14 Графики зависимостей компонент нормальных напряжений σ_{xl}, σ_{yl} от свойств почвы E, η , скорости перемещения лемеха V_m и коэффициентов a, b, c уравнения его плоскости

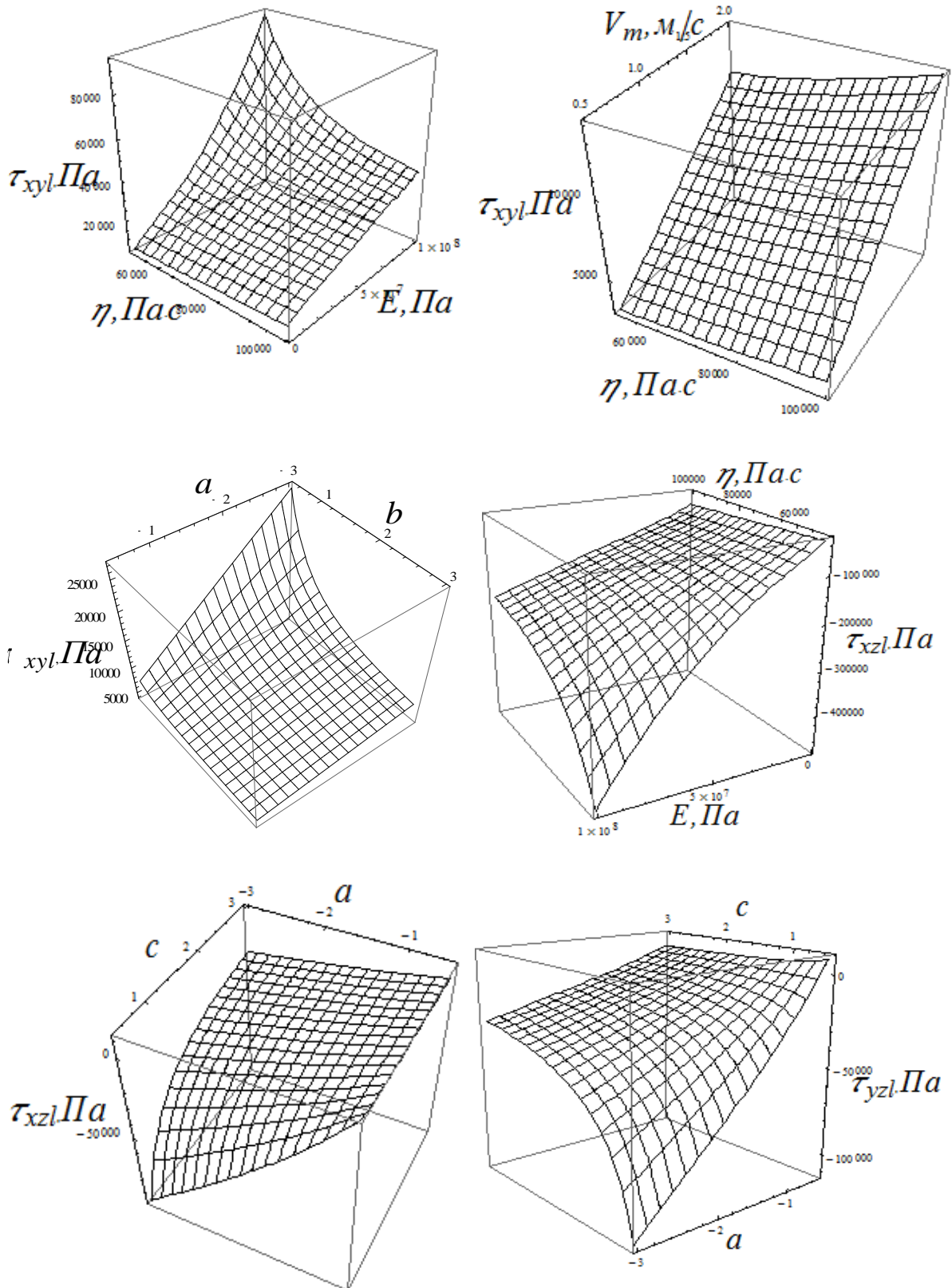


Рис. 2.15 Графики зависимостей компонент касательных напряжений $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ от свойств почвы E, η , скорости V_m перемещения лемеха и коэффициентов a, b, c уравнения его плоскости

Анализируя зависимости изменения компонент напряжений (рис. 2.14, 2.15), следует отметить, что возрастание модулей упругости E и вязкости η приводят к увеличению всех компонент напряжений. Увеличение поступательной скорости перемещения лемеха V_m ведет к линейному возрастанию компонент напряжений, которое проявляется более существенно с возрастанием модуля вязкости почвы. Влияние углов наклона нормали к поверхности лемеха аналогично такому, которое проявляется для компонент скоростей деформаций.

Как было указано в пункте 2.5 (зависимость (2.12), под воздействием изменения напряженно-деформированного состояния почвы (грунта) на границе контакта с рабочим органом происходят изменения плотности самой почвы (грунта).

Величина гидростатического напряжения определяется как $\sigma_{ml} = (\sigma_{xl} + \sigma_{zl} + \sigma_{yl})/3$, а величина максимального касательного напряжения для прикладных решений, согласно результатам исследований Новожилова [96], может быть представлена среднеквадратическим

компонент касательных напряжений в виде: $\tau_{ml} = \sqrt{(\tau_{xyl}^2 + \tau_{xzl}^2 + \tau_{yzl}^2)}/3$.

Зависимости величин гидростатических и наибольших касательных напряжений от свойств почвы и параметров лемеха приведены на рисунке 2.15. Используя второе из выражений (2.19) и учитывая то, что для конкретной почвы при определенном ее состоянии величина $b = const$, с использованием вышеизложенных результатов можно построить зависимости изменения плотности почвы от ее механических свойств, геометрических параметров лемеха и скорости его движения. Сами зависимости в конечном виде не могут быть приведены в пределах монографии, а графическая интерпретация этих зависимостей представлена на рис. 2.16 - 2.17.

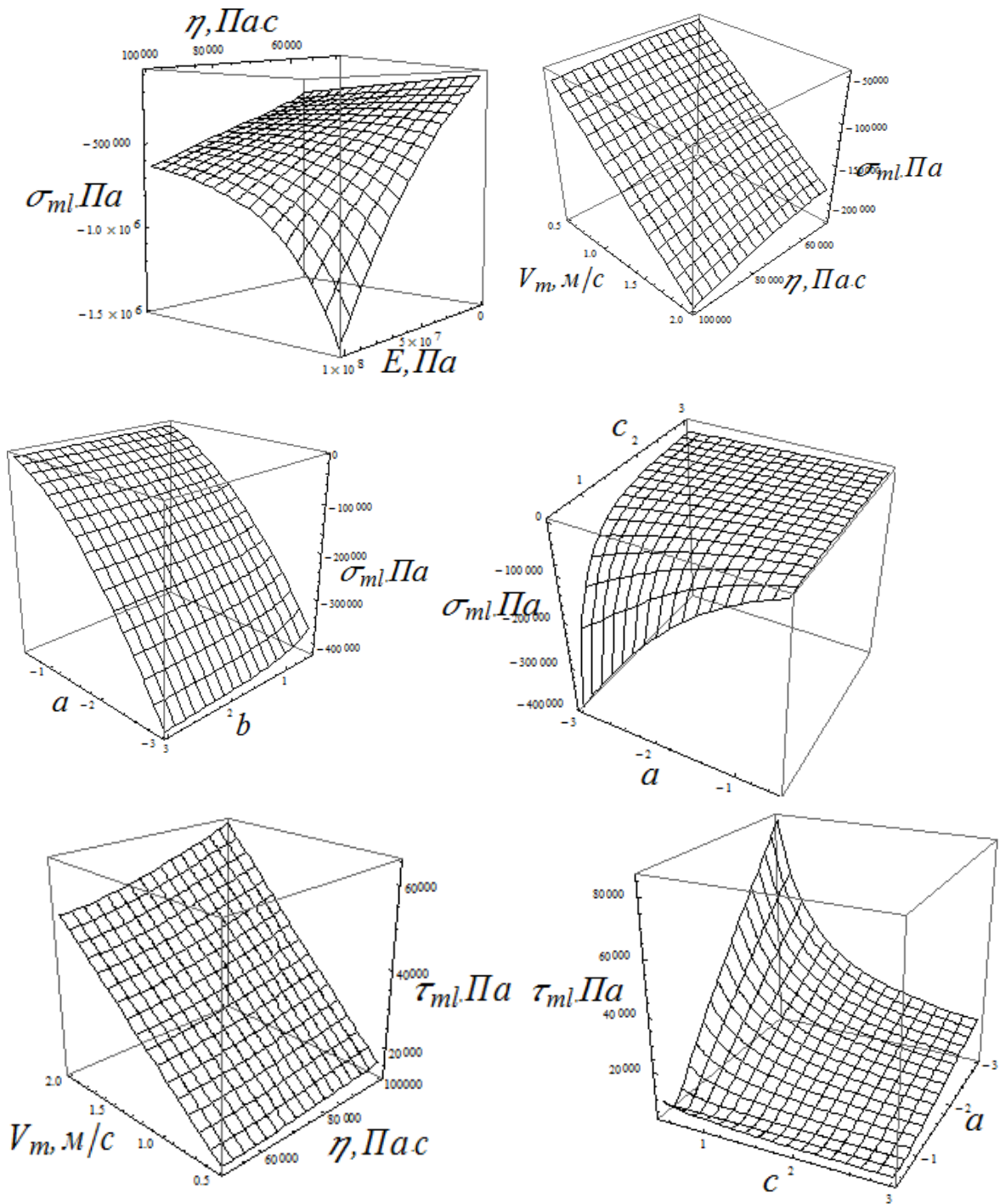


Рис. 2.16 Графики зависимостей гидростатических и наибольших касательных напряжений σ_{ml}, τ_{ml} почвы от ее свойств E, η , скорости V_m перемещения лемеха и коэффициентов a, b, c уравнения его плоскости

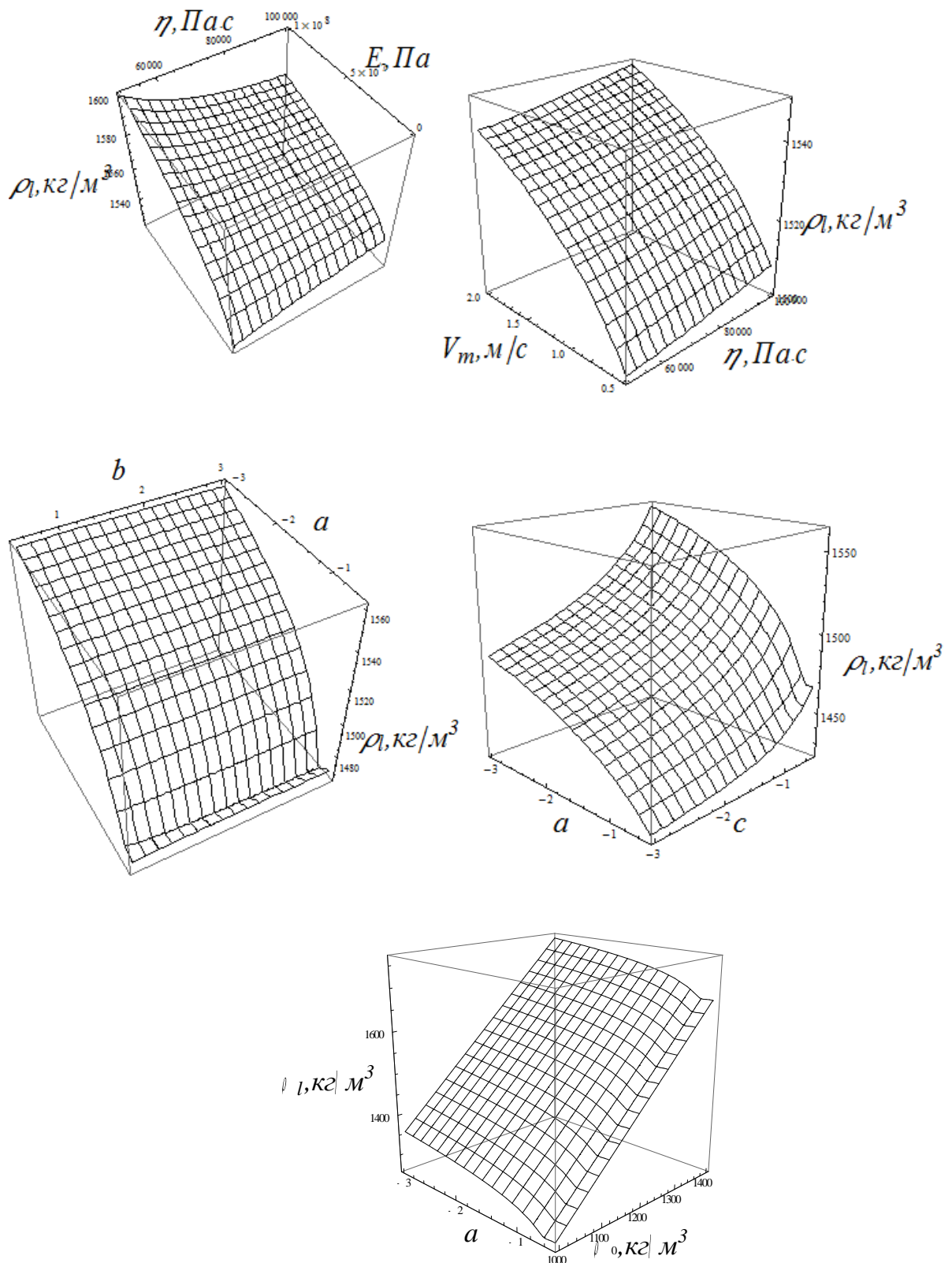


Рис. 2.17 Графики зависимостей изменения плотности почвы ρ_l в зоне контакта с лемехом от ее свойств E, η , скорости V_m перемещения лемеха и коэффициентов a, b, c уравнения его плоскости

Распределения компонент давлений почвы (грунта) на поверхность лемеха могут быть определены из условий равновесия на поверхности:

$$dF_{xl} = \sigma_{xl}l_l + \tau_{xyl}m_l + \tau_{xzl}n_l; dF_{yl} = \tau_{xyl}l_l + \sigma_{yl}m_l + \tau_{yzl}n_l;$$

$$dF_{zl} = \tau_{xzl}l_l + \tau_{yzl}m_l + \sigma_{zl}n_l, \quad (2.20)$$

где $dF_{xl}, dF_{yl}, dF_{zl}$ – проекции на соответствующие оси координат компонент давлений почвы на поверхность кротователя, l_l, m_l, n_l – направляющие косинусы нормали к поверхности рабочего органа.

Интегрирование выражений (2.20) по проекциям, перпендикулярным соответствующим индексам компонент давлений, дает величины сил сопротивления движению кротователя в почве (грунте):

$$F_{xl} = \int_{-r}^r \int_r^B dF_{xl} d\eta_l d\zeta_l; F_{yl} = \int_{-r}^r \int_0^{L_l} dF_{yl} d\xi_l d\zeta_l; dF_{zl} = \int_0^{BL_l} dF_{zl} d\xi_l d\eta_l. \quad (2.21)$$

Зависимости (2.21) в конечном виде не могут быть приведены в работе вследствие их громоздкости, а графическая интерпретация этих зависимостей представлена на рисунках 2.18 - 2.20.

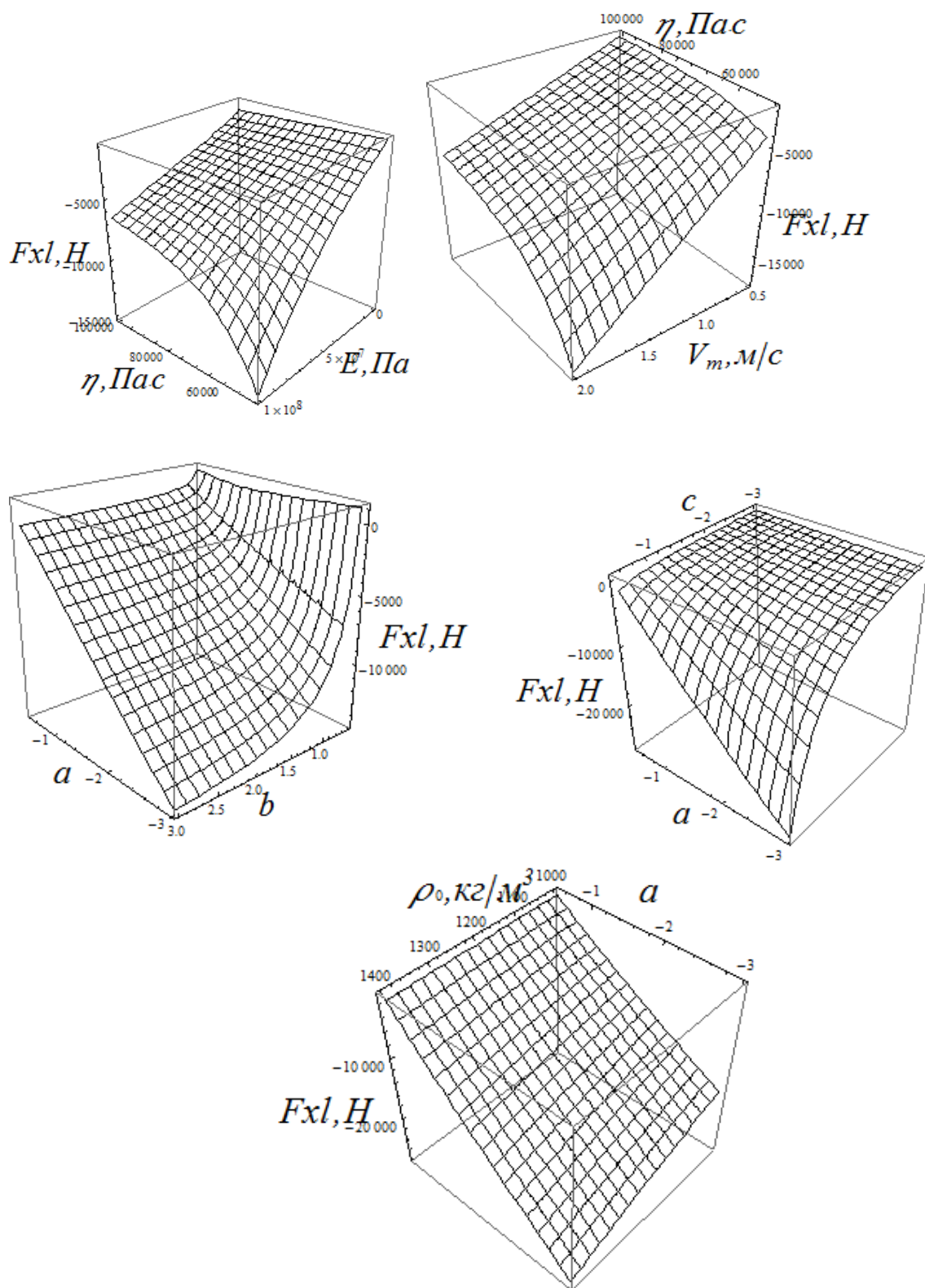


Рис. 2.18 Графики зависимостей сопротивления движению лемеха F_{xl} в направлении поступательного движения рабочего органа от свойств почвы E, η , скорости V_m перемещения лемеха и коэффициентов a, b, c уравнения его плоскости

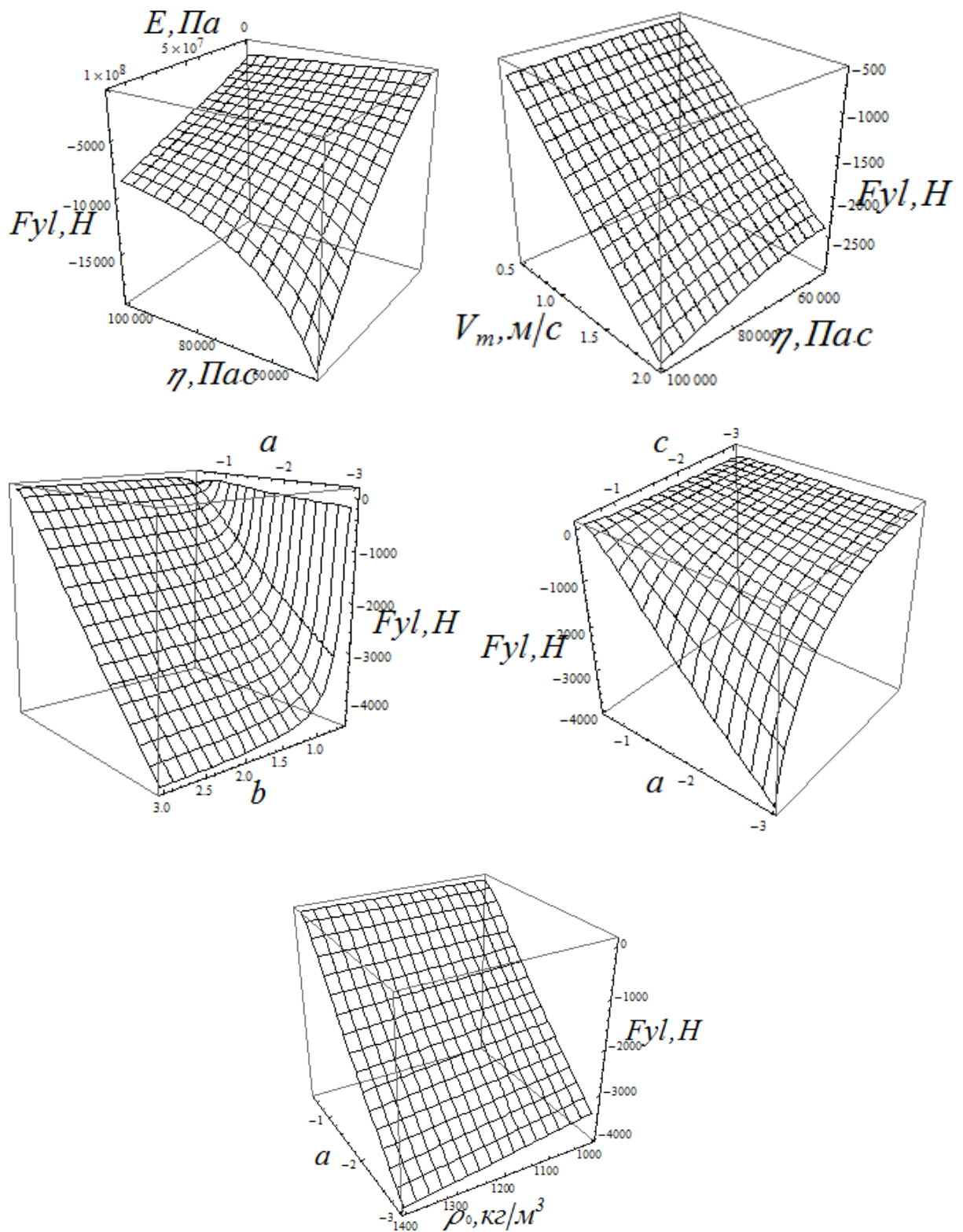


Рис. 2.19 Графики зависимостей сопротивления движению лемеха F_{yl} в горизонтально-поперечном направлении от свойств почвы E, η , скорости V_m перемещения лемеха и коэффициентов a, b, c уравнения его плоскости

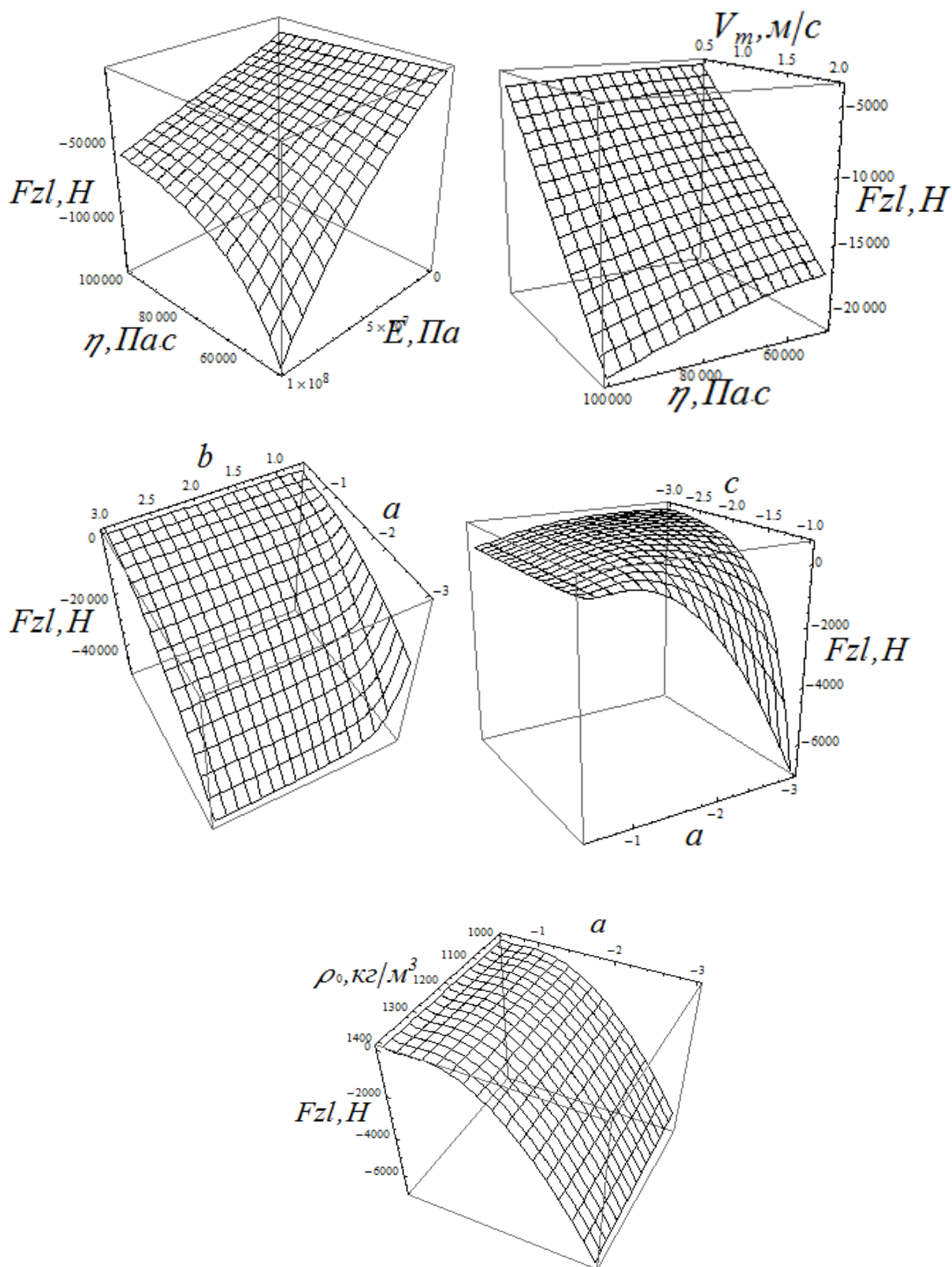


Рис. 2.20 Графики зависимостей сопротивления движению лемеха F_{zl} в вертикальном направлении от свойств почвы E, η , скорости V_m перемещения лемеха и коэффициентов a, b, c уравнения его плоскости

Суммарное сопротивление перемещению лемешной части рабочего органа в почве состоит из составляющей сопротивления почвы F_{xl} и сил трения по поверхности лемеха, спроектированных на направление движения. Тогда общая сила сопротивления движению выразится следующим образом:

$$F_{xtl} = F_{xl} - \left(\sqrt{(F_{yl ml})^2 + (F_{zl nl})^2} \right) \operatorname{tg} \psi, \quad (2.22)$$

где ψ – угол трения почвы по материалу поверхности лемеха.

Графически зависимости общего сопротивления движению и изменение плотности почвы для величин коэффициентов плоскости, близким к рациональным, представлены на рисунке 2.20.

Основным изменением, достигаемым при работе лемеха, должно быть уплотнение почвы для того, чтобы в ней сохранялось пространство для протяжки экрана. При этом плотность почвы должна возрастать. Поскольку на механические свойства почвы влияния оказать нельзя, то достигнуть ее максимального уплотнения можно изменением углов наклона нормали к поверхности лемеха по отношению к осям координат почвенного пространства и изменением скорости поступательного движения рабочего органа.

Анализируя влияние коэффициентов уравнения плоскости a, b, c на изменение плотности почвы (рис. 2.17), следует отметить, что коэффициент наклона b не оказывает влияния на изменение плотности почвы ρ_l , а увеличение коэффициента a приводит к возрастанию плотности почвы в зоне контакта. Аналогично, уменьшение коэффициента c приводит к возрастанию плотности почвы. К возрастанию плотности ведет и увеличение скорости поступательного движения рабочего органа V_m . Вместе с тем, следует принимать во внимание и изменение составляющих сил сопротивления движению рабочего органа (рис. 2.18 – 2.21).

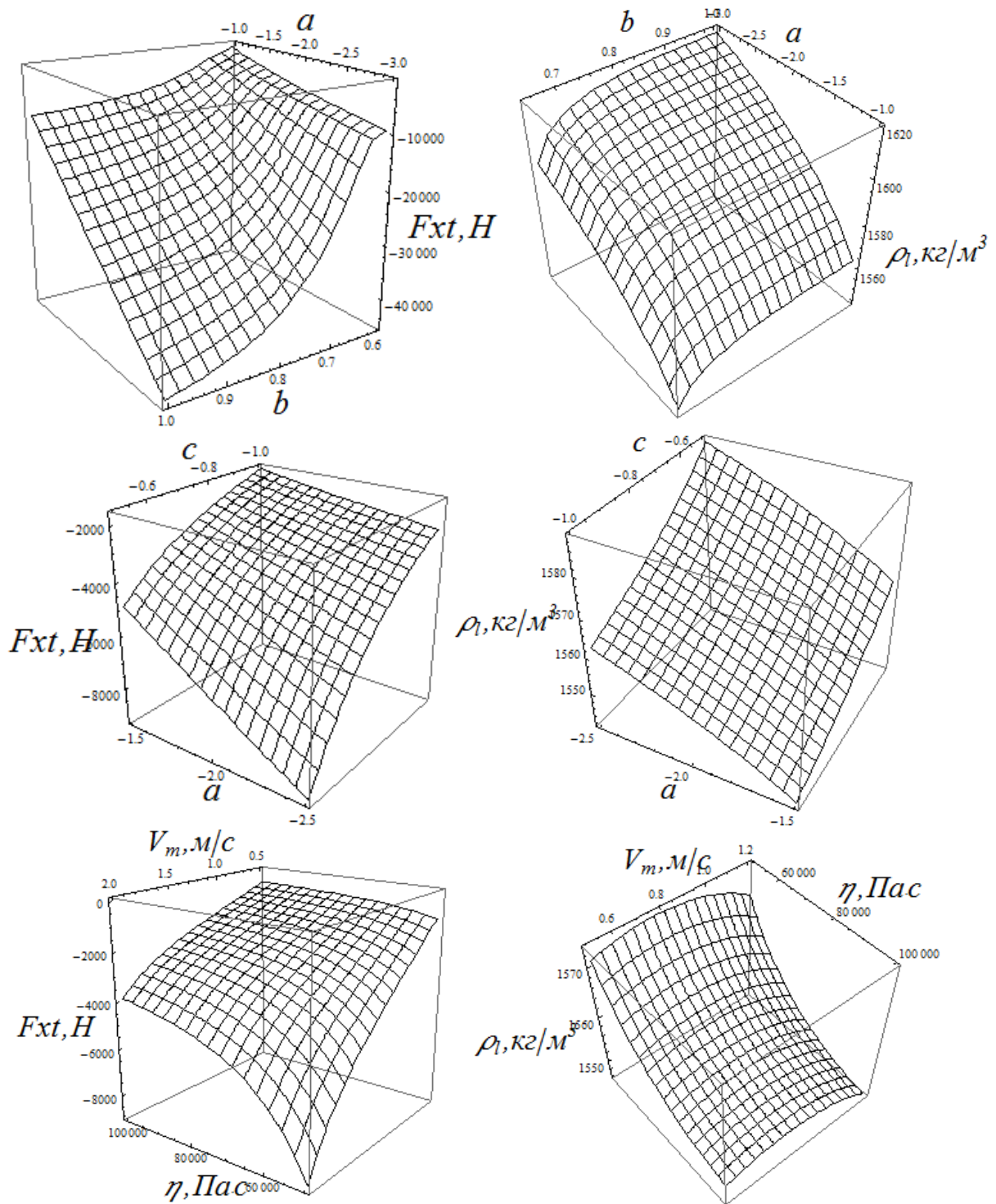


Рис. 2.21 Графики зависимостей сопротивления движению лемеха F_{xt} в направлении перемещения рабочего органа и изменения плотности почвы ρ_l от модуля вязкости почвы η , скорости V_m перемещения лемеха и коэффициентов a, b, c уравнения его плоскости

Так, увеличение скорости движения V_m , уменьшение коэффициента c и увеличение коэффициента a , приводят к возрастанию сил сопротивления движению рабочего органа. То есть, для получения необходимого эффекта уплотненной стенки щели, которая обеспечит беспрепятственное протягивание экрана, необходимо затрачивать большие усилия.

Таким образом, в результате проведенного анализа получены компоненты скоростей относительных деформаций почвы на поверхности контакта с лемешным рабочим органом, а также компоненты напряжений в почве (грунте) на поверхности контакта с лемешной частью рабочего органа. Получены зависимости уплотнения почвы и составляющие сопротивления почвы движению рабочего органа в зависимости от геометрических параметров и режимов движения рабочего органа, а также механических свойств почвы (грунта).

Исследования показали, что для обеспечения беспрепятственной протяжки экрана (минимальное трение экрана о стенки щели) лемех может быть выполнен в виде плоскости с минимально возможными коэффициентами $b < 1$ и $c < -1$, при этом коэффициент $a \rightarrow -2$, с учетом геометрических размеров такой плоскости. При таких параметрах плоскость лемеха обеспечит максимально возможное уплотнение почвы при наименее возможном сопротивлении движения рабочему органу.

2.5 Анализ затрат энергии на протягивание трубы увлажнителя с противофильтрационным экраном

В процессе протягивания оросителя в образованной кротователем полости на границе контакта поверхности трубы оросителя со стенкой кротовины возникают силы трения. При этом следует учитывать, что давление на стенки кротовины от действия сил тяжести трубы распределено по определенному закону, следовательно, силы трения при распределенной нагрузке должны быть определены как произведения коэффициента трения и

интегральной функции силы, распределенной по длине сечения нижней части трубы (рис. 2.22).

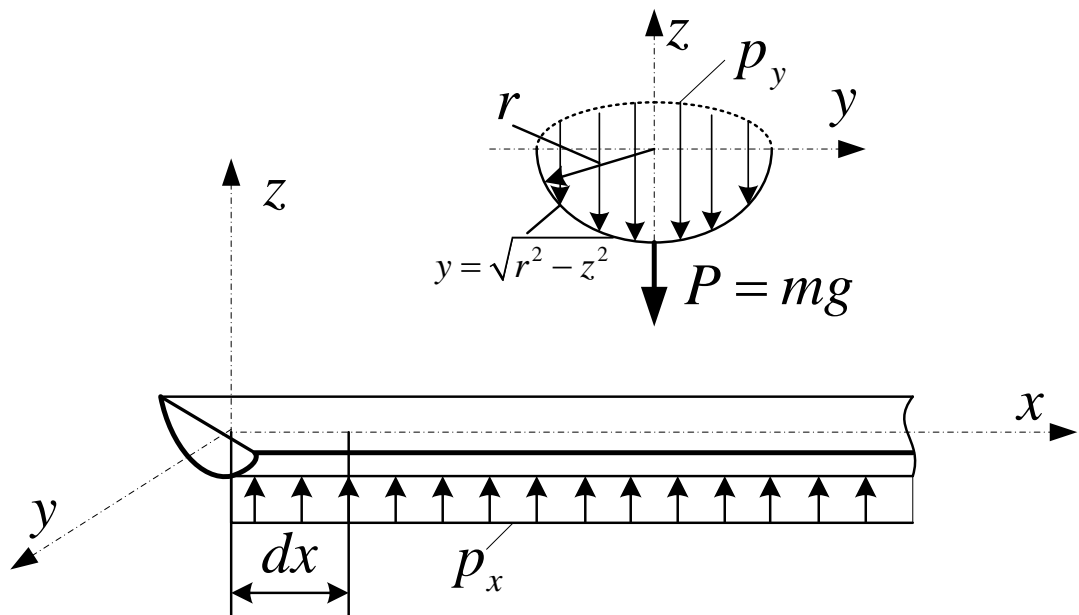


Рис. 2.22 Распределение давления трубы оросителя на дно образованной кротовины

А с учетом силы, распределенной по длине трубы, – еще и как интегральная функция полученной силы трения по поперечному сечению трубы.

Кривая в поперечном сечении yoZ поверхности трубы, которая соприкасается с дном кротовины, определяется функцией:

$$y = \sqrt{r^2 - z^2}; z = \sqrt{r^2 - y^2}, \quad (2.23)$$

где r – радиус трубы и соответственно радиус кротовины.

Распределенная по сечению трубы сила может быть получена на основании приравнивания сосредоточенной силы тяжести, отнесенной к проекции сечения на поперечную ось, и криволинейного интеграла первого рода, по которому определяется сосредоточенная сила от функции распределения силы. Связь сосредоточенной силы с распределенной по сечению силой может быть записана в виде:

$$\left(\frac{P}{2r}\right) = \frac{d}{dy} \int_{-r}^r p_y \sqrt{1 + (z'[y])^2} dy, \text{ или } \left(\frac{P}{2r}\right) = p_y \sqrt{1 + (z'[y])^2}, \quad (2.24)$$

где $P = mg$ сила веса элементарной длины трубы, m – масса элементарного участка длины трубы, p_y – распределенная по сечению трубы сила, $z'[y]$ – производная функции z по y .

Подстановка во второе уравнение (2.24) значения производной

$$z'[y] = -\frac{y}{\sqrt{r^2 - y^2}} \text{ дает выражение:}$$

$$P/2r = p_y \sqrt{1 + y^2 / (r^2 - y^2)},$$

решение которого относительно распределенной силы приводит к выражению:

$$p_y = P / \left(2r \sqrt{r^2 / (r^2 - y^2)} \right). \quad (2.25)$$

Интегрирование выражения (2.25) по длине нижней части окружности трубы и умножение его на коэффициент внешнего трения материала трубы о грунт, а также с учетом того, что $P = mg$, дает удельную силу трения элементарного участка трубы dx :

$$F_m = tg[\psi] \int_{-r}^r mg / \left(2r \sqrt{r^2 / (r^2 - y^2)} \right) dy = \frac{g m \pi \sqrt{r^2} tg[\psi]}{4 |r|}. \quad (2.26)$$

Интегрирование выражения (2.26) по длине протягиваемого оросителя дает выражения изменения усилия протягивания в функции длины трубопровода x :

$$F_t = \int \frac{g m \pi \sqrt{r^2} tg[\psi]}{4 |r|} dx = \frac{x g m \pi \sqrt{r^2} tg[\psi]}{4 |r|} \quad (2.27)$$

Аналогично получению зависимости (2.27), может быть получена зависимость сил трения при протягивании противofильтрационного экрана.

При этом решение упрощается вследствие отсутствия необходимости применения криволинейного интеграла первого рода, поскольку поверхность контакта является плоскостью.

Распределенная сила давления элементарного участка длины экрана dx шириной $2b$ будет иметь вид $p_{ye} = m_e g / (2b)$. Удельная сила трения элементарного участка экрана dx :

$$F_{me} = tg[\psi_e] \int_{-r}^r m_e g / (2b) dy = g m_e tg[\psi_e],$$

а выражения изменения усилия протягивания экрана в функции длины оросителя x :

$$F_{te} = \int g m_e tg[\psi_e] dx = x g m_e tg[\psi_e]. \quad (2.28)$$

Таким образом, анализируя зависимости (2.27) и (2.28) можно сделать вывод о том, что на усилие протягивания оросительной трубы и противофильтрационного экрана не оказывают влияния их геометрические размеры, а оказывает влияние удельная, отнесенная к единице длины, масса и увеличение сопротивления протягиванию, которое прямо пропорционально длине трубы (экрана). Кроме того, существенно влияет коэффициент внешнего трения материала трубы (экрана) о почву.

2.6 Анализ процесса сводообразования после прохождения лемешной части рабочего органа

При прохождении рабочего органа, который образует полость для протягивания противофильтрационного экрана, в верхней части образованной полости изменяется напряженно-деформированное состояние почвы (грунта). При этом вполне вероятно возникновение такого напряженного состояния, при котором верхняя часть образованной полости остается неразрушенной вследствие возникновения напряженного состояния, характеризующегося сводообразованием. Такие явления широко известны в механике сыпучих сред, которые являются частным случаем теории

пластичности. Как известно, грунт или почва могут быть представлены как пластическая среда, в частности сыпучая связная среда. Это показали еще Хаар и Карман [93].

Поэтому если представить почву (грунт) как сыпучую связную среду (частный случай теории пластичности), то для нее может быть применен критерий прочности k в виде [62]:

$$k = \frac{-3(\sigma \sin[\phi] + \tau_0 \cos[\phi])}{-3 + \sin[\phi]}, \quad (2.29)$$

где σ – гидростатическое напряжение на поверхности возможного скольжения по линии разрушения, ϕ – угол внутреннего трения почвы (грунта), τ_0 – начальное напряжение сдвига (или часто применяемый термин «коэффициент сцепления»).

Для плоского напряженного состояния в плоскости zOy , перпендикулярной направлению движения рабочего органа, гидростатическое напряжение будет иметь вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_y + \sigma_z}{3}.$$

Величины компонент напряжений σ_y, σ_z были определены выше при анализе взаимодействия лемешной части рабочего органа с почвой (грунтом).

Две другие составляющие критерия прочности являются величинами, определяемыми механическими свойствами почвы (грунта), которые в свою очередь, зависят от типа почвы (грунта), ее плотности и влажности.

Если принять во внимание то, что после прохода рабочего органа в почве (грунте) образовывается клиновидное (линии скольжения среды направлены под углом к вертикали) разуплотненное тело, причем, как принято в общепринятом описании процесса обработки почвы, угол наклона линий скольжения составляет угол, равный углу внутреннего трения ϕ , а среда, которая находится вне пределов клиновидного тела, остается в первоначальном состоянии, то почву (грунт) внутри линий скольжения

можно рассматривать как среду, находящуюся в емкости, ограниченной линиями скольжения. Принимая во внимание вышеизложенное, к среде, которая находится в квазиемкости с углами наклона стенок, равными углам наклона линий скольжения ϕ , могут быть применены законы, описывающие поведение сыпучей среды (частный случай теории пластичности) в емкости, ограниченной стенками (рис. 2.23)

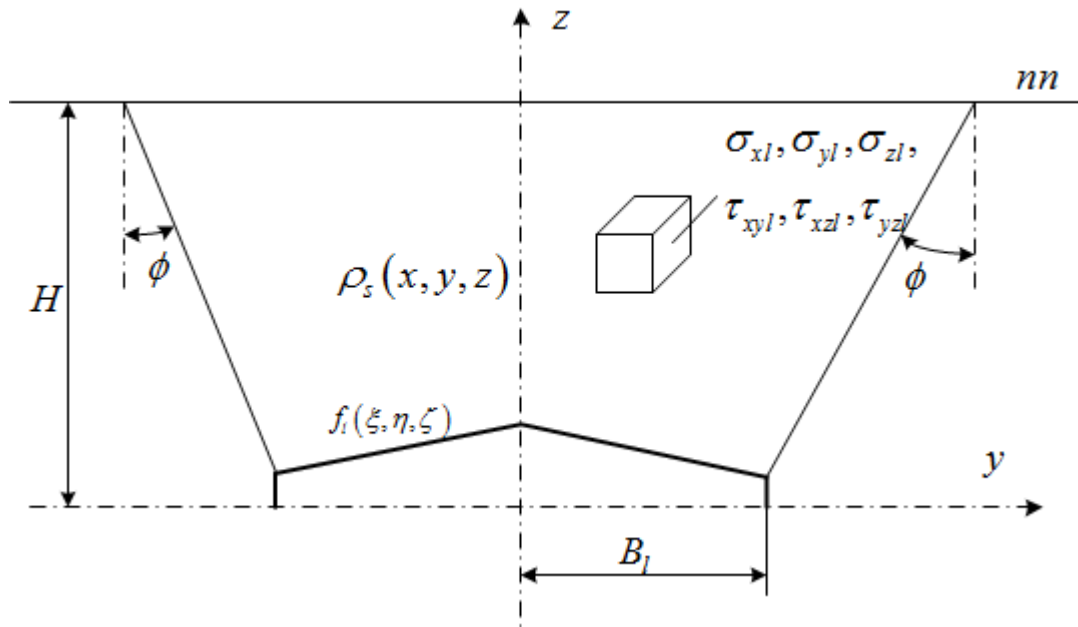


Рис. 2.23 Схема квазиемкости с почвой (грунтом), которая создает напряжения на верхнюю часть образованной полости

В этом случае гидростатическое напряжение в клиновидном пространстве может быть описано зависимостью [41]:

$$\sigma = \frac{1}{3} b \rho g \left(1 + e^{\left(\frac{-z}{2\pi R} \right)} \operatorname{arctg} \left[\frac{R}{r + R} \right] \right) (\sin[\phi] - 3), \quad (2.30)$$

где b – некий экспериментальный коэффициент, который зависит от типа материала и находится в пределах 0.5—1.5, ρ – плотность материала. Уравнение (2.30) записано в цилиндрической системе координат при отсутствии кручения, поэтому оно легко может быть трансформировано для плоской Декартовой системы, если R – наибольший радиус емкости, в

которой определяются напряжения, заменить на $(B_l + H \operatorname{tg}[\phi])$, где B_l – ширина лемеха, H – глубина хода рабочего органа, z – текущее значение вертикальной координаты, $r \rightarrow y$ – текущее значение поперечной координаты, в которой определяются напряжения, то выражение примет вид:

$$\sigma = \frac{1}{3} b g \rho \left(1 + e^{-\frac{z}{b+H \operatorname{tg}[\phi]}} \operatorname{arctg} \left[\frac{b + H \operatorname{tg}[\phi]}{b + y + H \operatorname{tg}[\phi]} \right] \right) (-3 + \sin[\phi]). \quad (2.31)$$

Согласно [62], компоненты напряжений на границе свода имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma - \frac{2}{3} k + 2k \cos[\alpha]^2; \sigma_z = \sigma - \frac{2}{3} k + 2k \sin[\alpha]^2; \\ \tau_{zy} &= 2k \cos[\alpha] \sin[\alpha], \alpha = \pi/2 + \sqrt{z/H} + \sqrt{y/B} \end{aligned} \quad (2.32)$$

С учетом вышеизложенных зависимостей (2.31) - (2.32), критическое напряжение, при котором произойдет разрушение почвы (грунта) в своде образованной полости, будет иметь вид:

$$k_{kr} = \frac{e^{-\frac{z}{b+H \operatorname{tg}[\phi]}} \left(-b g \rho \operatorname{arctg} \left[\frac{b + H \operatorname{tg}[\phi]}{b + y + H \operatorname{tg}[\phi]} \right] (-1 + \cos[2\phi] + 6 \sin[\phi]) - \right.}{(-3 + \sin[\phi])^2} \left. - e^{-\frac{z}{b+H \operatorname{tg}[\phi]}} (\tau_0 \cos[\phi] (-9 + \sin[\phi]) + b g \rho (-1 + \cos[2\phi] + 6 \sin[\phi])) \right) \quad (2.33)$$

Графически зависимость (2.33) представлена на рисунке 2.24.

Если сравнивать значения критического напряжения разрушения почвы и максимальные сдвиговые напряжения, которые возникают в процессе взаимодействия лемешной части рабочего органа с почвой, то можно сделать вывод о том, что максимальные сдвиговые напряжения, вызываемые лемешной частью рабочего органа k_l , не превышают критических напряжений Kkr , при которых возможно разрушение почвы (грунта) в зоне образованной рабочим органом полости.

Таким образом, при правильном выборе рациональных геометрических параметров и режимов работы лемешной части рабочего органа в почве (грунте) может быть образована устойчивая к разрушению полость, в которой протягивается противофильтрационный экран без зажатия его обрушившимся сводом образованной полости.

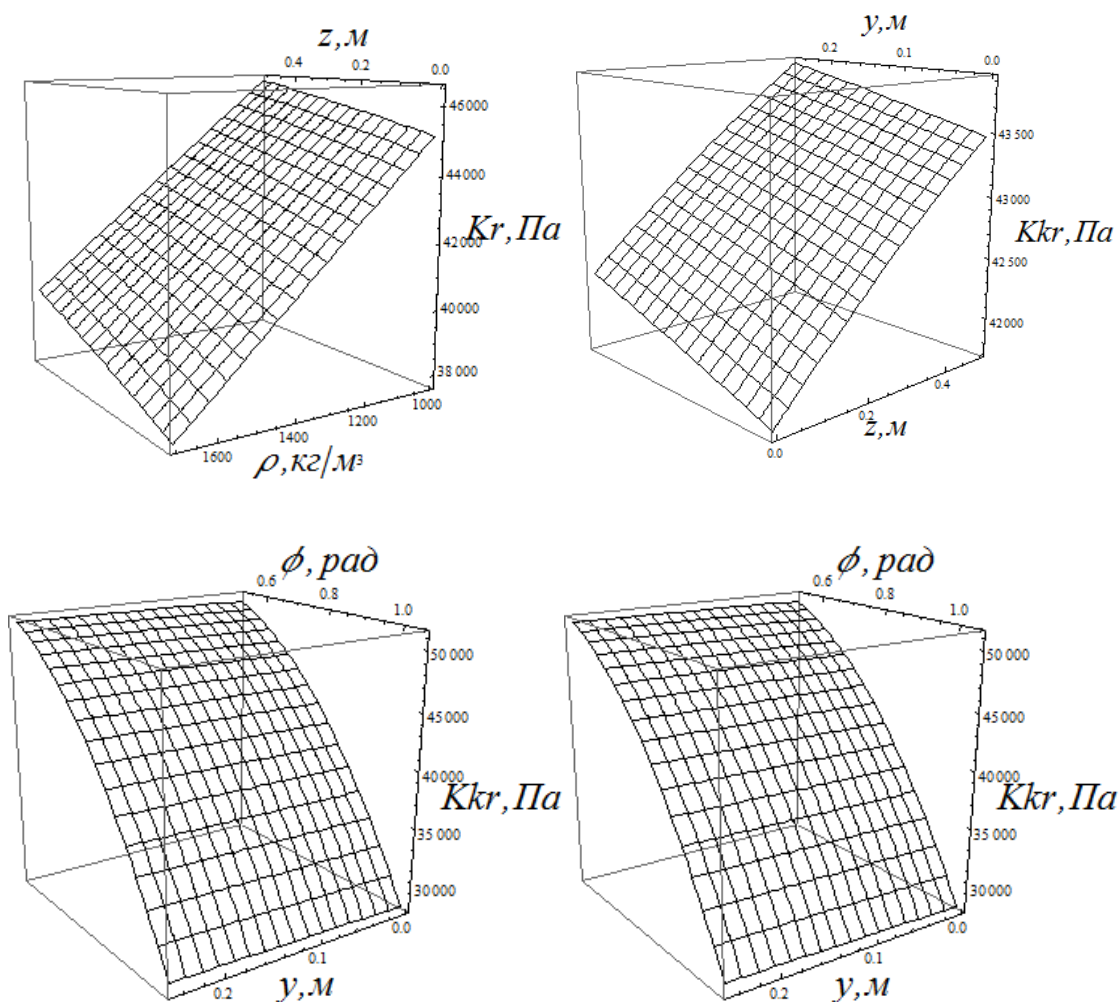


Рис. 2.24 Зависимость критического напряжения разрушения почвы от координат полости и механических свойств почвы

По своей сути значение K_{kr} – это критическое касательное напряжение, которое создается в своде почвы (грунта) силой веса выше

лежащей почвы (грунта) в условном конусе разуплотненной в верхней части почвы и уплотненной в зоне прохода лемеха.

По условию прочности (зависимость 2.29), лемешная часть создает величину критического напряжения, которая определяется с учетом

зависимостей (2.18), как $k_l = \frac{-3[\sigma_l \sin \phi + c]_0 \tau \cos \phi}{-3 + \sin \phi}$, и может быть

графически отображена на рис. 2.25.

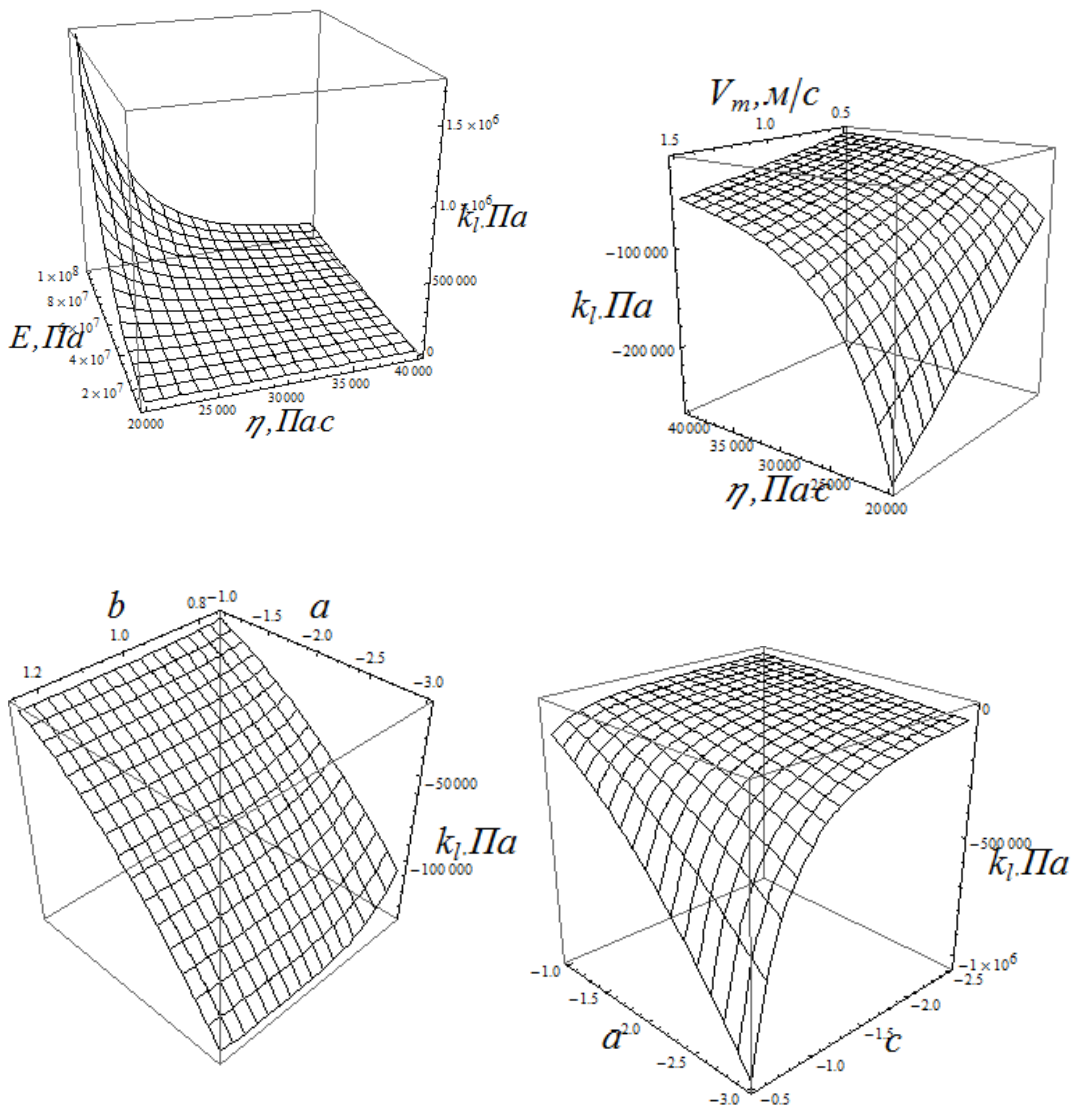


Рис. 2.25 Зависимость критических напряжений, создаваемых лемешной частью рабочего органа на поверхности контакта его с почвой (грунтом), т.е. поверхности свода от параметров лемеха, скорости его движения и свойств почвы (грунта)

Анализируя величины критических напряжений Kkr , созданных весом клина почвы (грунта) над полостью (рис. 2. 24), в верхней части полости, образованной лемешной частью рабочего органа, и критическими напряжениями k_l , созданными в верхней части полости лемешной частью рабочего органа (рис. 2.25), при различных его параметрах и свойствах почвы (грунта), можно прийти к выводу, что критические напряжения, созданные весом почвы (грунта), не превышают в большей части областей существования параметров лемеха и свойств почвы (грунта) критических напряжений, созданных лемехом. Это позволяет судить о том, что верхняя часть полости является устойчивой против разрушения и не должна препятствовать протяжке противифльтрационного экрана.

2.7 Выводы по разделу

На основании проведенного анализа динамики контактного взаимодействия кротователя с почвой установлены компоненты нормальных и сдвиговых напряжений почвы на поверхности контакта. Определены направления и величины уплотнения почвы в зависимости от механических свойств почвы, геометрических параметров кротователя и скорости его поступательного перемещения. Определены составляющие сил сопротивления почвы движению кротователя в почве в зависимости от геометрических параметров и скорости его поступательного перемещения, а также механических свойств почвы.

Анализируя зависимости уплотнения почвы стенок образованной кротовины и сопротивление почвы (грунта) передвижению рабочего органа, можно прийти к выводу, что для большинства почв (грунтов) по механическим характеристикам наиболее рациональными будут следующие геометрические параметры конусной части рабочего органа: заострение $a \approx 0.02$, радиус основания конуса $r \approx 1.1r_t$, где r_t – радиус трубы оросителя, при скорости движения $V_m \approx 1 м / с$.

На основе анализа взаимодействия лемешной части рабочего органа определены функции изменения плотности почвы (грунта) в стенках образованной кротовины. Получены компоненты сопротивления перемещению лемешной части рабочего органа в зависимости от параметров конуса и механических свойств почвы (грунта).

Таким образом, исследования показали, что для обеспечения беспрепятственной протяжки экрана (минимальное трение экрана о стенки щели) лемех может быть выполнен в виде плоскости с минимально возможными коэффициентами $b < 1$ и $c < -1$, при этом коэффициент $a \rightarrow -2$, с учетом геометрических размеров такой плоскости. При таких параметрах плоскость лемеха обеспечит максимально возможное уплотнение почвы при наименее возможном сопротивлении движения рабочему органу.

Анализируя величины критических напряжений Kkr в верхней части полости, образованной лемешной частью рабочего органа, созданных весом клина почвы (грунта) над полостью, и критическими напряжениями k_l , созданными в верхней части полости лемешной частью рабочего органа, при различных его параметрах и свойствах почвы (грунта) позволяет судить о том, что верхняя часть полости является устойчивой против разрушения и не должна препятствовать протяжке противофильтрационного экрана.

Анализ сопротивления протягиванию оросительной трубы и противофильтрационного экрана свидетельствует о том, что на усилие протягивания оросительной трубы и экрана не оказывают влияния их геометрические размеры, а оказывает влияние удельная, отнесенная к единице длины, масса и увеличение сопротивления протягиванию, которое прямо пропорционально длине трубы (экрана). Кроме того, существенно влияет коэффициент внешнего трения материала трубы (экрана) о почву (грунт).

РАЗДЕЛ 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

Программой экспериментальных исследований предусматривалось:

- определение механических свойств почвы (грунта), а именно плотности ρ , $г/см^3$, модуля упругости E , $Па$, коэффициента вязкости μ , $Пас$, начального напряжения сдвига τ_0 , $Па$;
- проверка адекватности полученных теоретических зависимостей уплотнения почвы конусной и лемешной частями рабочего органа кротователя;
- проверка адекватности полученных теоретических зависимостей сопротивления перемещению рабочего органа кротователя;
- проверка адекватности полученных теоретических зависимостей протяжки увлажнителя с противофильтрационным экраном.

На основании анализа литературных данных и проведенных теоретических исследований основными факторами, влияющими на выполнение процесса образования кротовин и протяжки увлажнителя с противофильтрационным экраном, являются состояние почвенной среды, тип и свойства почвенной среды, геометрические параметры и режимы работы рабочего органа кротователя.

Для проведения экспериментальных исследований использовались как стандартные методики, так и разработанные автором и его руководителем.

3.2 Методика экспериментальных исследований

3.2.1 Методика определения уплотнения почвы рабочим органом для образования кротовин

Плотность почвы определяли в полевых условиях при естественном сложении и в срезе образованной кротовины буровым методом Н. А. Качинского [56], который основан на взятии образца почвы ненарушенного

сложения с помощью цилиндра-бура определенного объема. Для пахотных рыхлых горизонтов используются цилиндры объемом 500 см³, для нижележащих плотных – 100–200 см³.

В наших исследованиях цилиндр-бур объемом 100 см³ забивали деревянным молотком в срез почвы в плоскости, перпендикулярной оси образованной кротовины. Почву в верхней и нижней частях цилиндра подрезали ножом вровень с краями цилиндра и помещали в предварительно взвешенные металлические бюксы, после высушивания которых при температуре 105⁰С, определяли влажность почвы.

Плотность сложения рассчитывали по формуле:

$$dv = \frac{P}{V},$$

где P – масса сухой почвы, г; V – объем цилиндра, см³ ($V = \pi r^2 h$, где h – высота цилиндра-бура, см; r – внутренний радиус заостренного конца цилиндра, см).

$$P = 100 / (100 + W) \times a,$$

где a – масса влажной почвы, г; W – влажность почвы, %

Исследования проводили в 5-кратной повторности.

3.2.2 Методика определения механических свойств почвы

Для определения таких свойств почвы, как модуль продольной упругости E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона η_1 , объемный модуль K , использована методика, предложенная В. П. Ковбасой, по определению объемного модуля упругости K и коэффициента вязкости μ путем исследования затухания колебаний груза на поверхности почвы [59].

В физические уравнения связи напряжений с деформациями входят такие реологические показатели почвы: модули упругости объемных K и

сдвиговых G деформаций, коэффициенты вязкости объемных μ и сдвиговых η_t деформаций.

Методика исследований этих показателей основывалась на изучении колебаний почвенных образцов, которая разработана А. С. Кушнаревым [77].

Для измерения затухающих колебаний почвенного образца нами было спроектировано и изготовлено прибор. Схема прибора и его внешний вид представлены на рисунках 3.1 и 3.2.

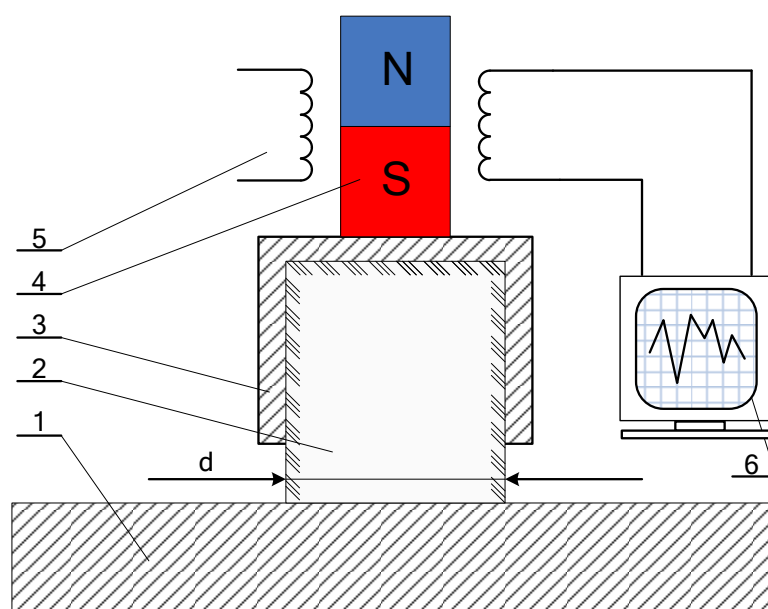


Рис. 3.1 Схема прибора для определения модулей упругости и вязкости почвы: 1 – станина; 2 – почвенный образец; 3 – стакан; 4 – постоянный магнит; 5 – катушка (~ 35000 витков); 6 – компьютер с АЦП L-305

Прибор состоит из станины 1, на которой установлено почвенный образец 2, стакана 3 с постоянным магнитом 4, катушки 5, которая имеет 35000 витков провода диаметром 0,1 мм. Стакан с постоянным магнитом надевается на почвенный образец. Стакан представляет собой отрезок пластиковой трубы с внешним диаметром 52 мм, толщина стенки 3 мм и высотой 35 мм, один конец которой запаян крышкой с приклеенным постоянным магнитом. Концы обмотки катушки подключались ко входу

компьютера с установленным аналого-цифровым преобразователем (L – 305) и программой ПОС-16. Для определения массы образца почвы использовались весы ВТК – 500.

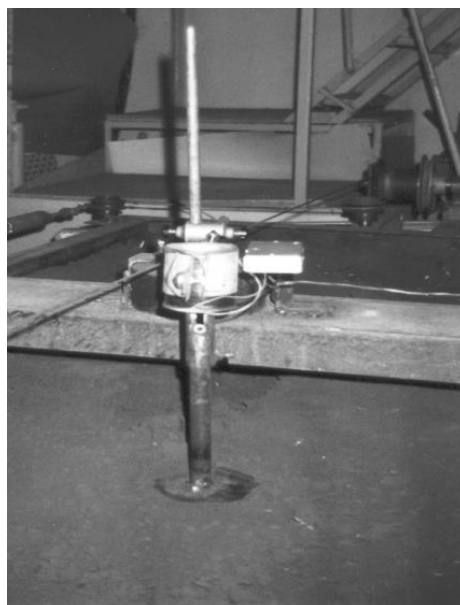
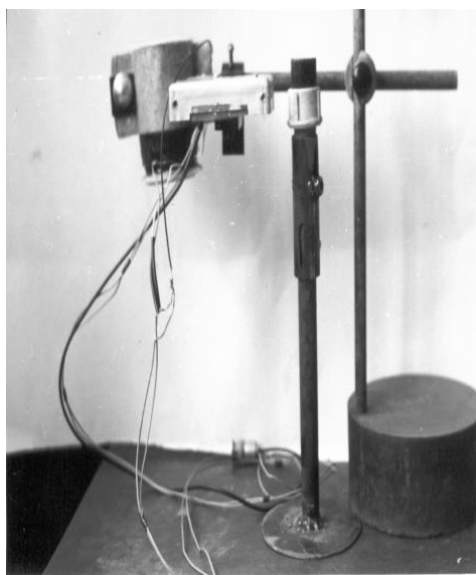


Рис. 3.2 Внешний вид прибора для определения модулей упругости и вязкости почвы

В качестве регистрирующей аппаратуры использовалась плата АЦП L-305 фирмы «L-card». Эту плату можно использовать как средство для многоканального сбора информации, а также завершённую систему с собственным процессором, которая позволяет пользователю реализовать собственные алгоритмы обработки сигналов на уровне программирования установленного на платах сигнального процессора американской фирмы Analog Devices. В комплект поставки платы входило программное обеспечение «Oscilloscope» с функцией прямой записи на диск. Программа OSCIL предназначена для работы с аналого-цифровыми платами, которые выпускаются фирмой «L-card». Программа позволяет осуществлять введение/выведение аналоговых сигналов, тестирование плат при наличии специальной тестовой заглушки, сохранять введенные сигналы в файл, а

также выполнять спектральный анализ сигналов, которые вводятся, и распечатывать графики.

Комплект поставки платы позволял:

- осуществлять многоканальное введение из аналоговых каналов с частотой до 300 кГц на канал;
- осуществлять асинхронное введение из различных аналоговых каналов;
- управлять цифрово-аналоговым преобразователем одновременно с аналоговым вводом;
- вводить в трех режимах: программном, непосредственного доступа к памяти и генерации прерываний IRQ;
- управлять цифровыми линиями в асинхронном режиме.

Управление платой и обмен данными осуществлялись через двунаправленный порт данных с автоматически устанавливаемыми и сбрасываемыми битами готовности. Управление аналоговым вводом и выводом, частотой преобразования и т.п. осуществляется процессором ADSP-2105. С помощью порта режима и порта данных в процессор можно загрузить программу, которая будет осуществлять необходимые алгоритмы ввода-вывода. Фирменный драйвер Lbios работает по принципу команд, когда управление происходит по двум линиям: через порт команд программы в процессоре передается номер команды, а через порт данных осуществляется передача параметров и данных. При записи числа в порт команд число записывается в порт данных и одновременно с этим в процессоре ADSP генерируется прерывание IRQ2.

Всеми периферийными устройствами на плате управляет процессор ADSP через собственное пространство адрес ввода-вывода. Компьютеру доступен только регистр данных, через который происходит обмен данными между компьютером и процессором ADSP.

Изучение последовательных амплитуд и периодов затухающих колебаний позволило определить свойства почвы. При этом модуль упругости объемных K и сдвиговых G деформаций определяется по формулам:

$$K = \frac{4P_0 l \left[\left(\ln(A_1/A_2) \right)^2 + 4\pi^2 \right]}{\pi g d^2 T^2 k^2}; \quad G = \frac{4P_0 l \left[\left(\ln(A_1/A_2) \right)^2 + 4\pi^2 \right]}{\pi g d^2 T^2 \nu^2}, \quad (3.1)$$

где: d, l, P_0 – диаметр, длина и масса образца почвы;

T, A_1, A_2 – период и амплитуды последовательных колебаний образцов почвы;

k, ν – решение соответствующих трансцендентных уравнений.

Зависимости для определения коэффициента вязкости при объемных μ и сдвиговых η деформациях имеют вид:

$$\mu = \frac{8P_0 l \ln(A_1/A_2)}{\pi g d^2 T}; \quad \eta = \frac{3P_0 \ln(A_1/A_2)}{\pi g d T} \quad (3.2)$$

Характерная осциллограмма колебаний почвы представлена на рис. 3.3.

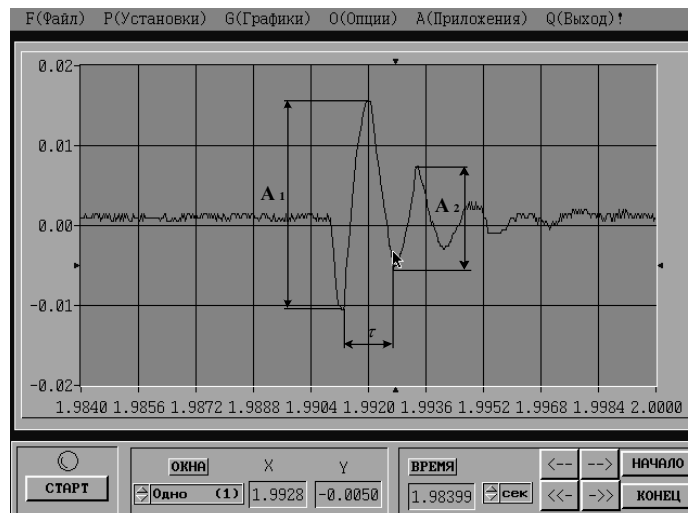


Рис. 3.3 Характерная осциллограмма колебаний почвы, записанная с использованием программы ПОС-16 и АЦП L-305

3.2.3 Методика определения тягового сопротивления рабочего органа при проходе без протягивания увлажнителя и с протягиванием его с противофильтрационным экраном

Для определения адекватности теоретических зависимостей сопротивления движения рабочего органа для образования полости, в которой протягивается ороситель с противофильтрационным экраном, а также сопротивления протягиванию оросителя с экраном вместе с одновременным образованием полости был изготовлен экспериментальный образец рабочего органа, общий вид которого представлен на рис. 3.4.

Все тензометрические исследования проводились на экспериментальной базе кафедры строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования Национального университета водного хозяйства и природопользования (г. Ровно).

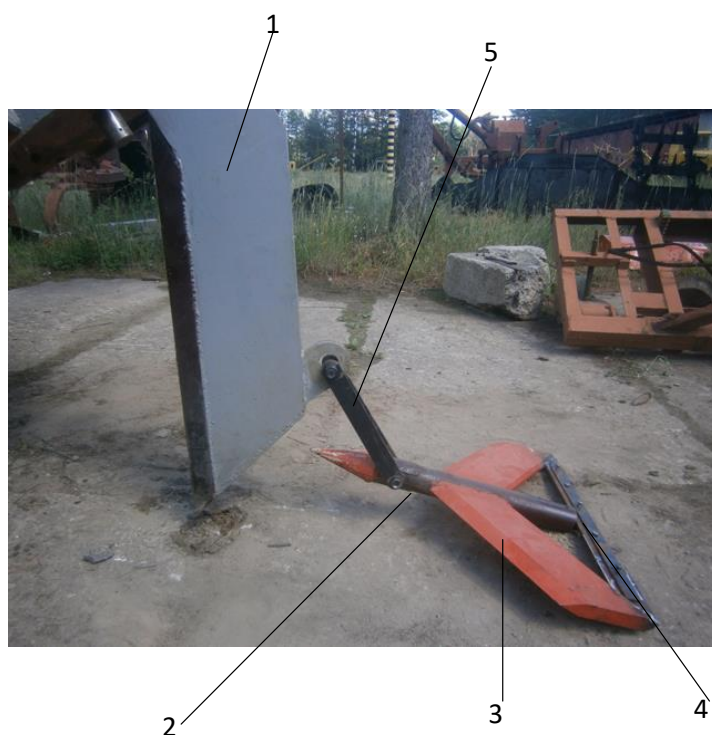


Рис. 3.4 Общий вид рабочего органа для протяжки оросителя с противофильтрационным экраном, закрепленного к стойке щелереза. 1 – стойка щелереза, 2 – кротовинообразующая часть, 3 – лемешная часть, 4 – зажимная часть для крепления противофильтрационного экрана, 5 – тяговый поводок для самоустановления рабочего органа

Измерение тягового сопротивления движению рабочего органа производили по следующей методике.

На первом этапе определялось тяговое сопротивление P_c движению стойки щелереза без закрепленного к ней рабочего органа.

Далее определялось суммарное сопротивление движению стойки P_c с закрепленным к ней рабочим органом для образования полости. При этом сопротивление движению рабочего органа для образования полости определялось как разница суммарного сопротивления за исключением сопротивления стойки $P_{po} = P_s - P_c$, где P_{po} , P_s – сопротивление рабочего органа и измеренное сопротивление, соответственно.

На следующем этапе производилось динамометрирование системы: стойка с рабочим органом и закрепленной трубой оросителя. При этом усилие протягивания трубы оросителя определялось как разница $P_t = P_{cc} - P_c$, где P_t , P_{cc} – сопротивление протягиванию трубы оросителя рабочего органа и измеренное сопротивление, соответственно.

На завершающем этапе тензометрирования производилась протяжка всего комплекта, состоящего из стойки с закрепленным на ней рабочим органом и прикрепленной к ней системой оросителя в виде трубы с противофильтрационным экраном. При этом сопротивление протягиванию противофильтрационного экрана определялось как разница $P_e = P_{ccc} - P_{cc}$, где P_{ccc} , P_{cc} – сопротивление протягиванию всей системы и сопротивление протягиванию, которое получено в предыдущем эксперименте.

Все измерения сопротивлений производились в трехкратной, то есть минимально допустимой, повторности. Это связано с большой трудоемкостью и затратностью проведения экспериментальных исследований.

Измерения тяговых сопротивлений производились с использованием электронного динамометра «Индикатор ИЕ-03-В», регистрация сигнала с

которого передавалась через АЦП в компьютер (рис. 3.5), в котором регистрировалась цифровая информация о силе в реальном времени. Перед применением указанного выше индикатора силы производилось предварительное грубое измерение силы тяги стрелочным динамометром.



Рис. 3.5 Агрегат, подготовленный к протяжке рабочего органа без трубы оросителя и противофильтрационного экрана

Все эксперименты по тензометрированию проводились с использованием двух тракторов, которые были сагрегатированы цугом. Между тракторами была установлена тензометрическая аппаратура рис (3.6-3.7). При этом тяговое усилие, необходимое для перемещения трактора, на котором устанавливался рабочий орган, определялось холостой его протяжкой с регистрацией усилий.

Такая схема измерений была вызвана отсутствием тензометрической навесной системы трактора. При этом передний трактор являлся чисто

тяговым, а задний использовался для агрегатирования навесного оборудования.



Рис. 3.6 Агрегатирование агрегата цугом для предварительного определения тягового усилия



Рис. 3.7 Агрегатирование агрегата цугом с включенной тензометрической аппаратурой

3.2.4 Методика статистической обработки результатов экспериментальных исследований

При проведении экспериментальных исследований, связанных с существенными материальными затратами, реализация необходимого количества повторностей с целью получения достаточной выборки практически неосуществима. Поэтому при оценке результатов малой выборки величина генеральной дисперсии в расчетах не используется. Для определения возможных пределов ошибки пользуются критерием Стьюдента:

$$t = \frac{\tilde{x} - \bar{x}}{m_{me}}$$

где $m_{me} = \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}$ – мера случайных колебаний выборочной средней в малой выборке, \tilde{x} – выборочная средняя эксперимента, \bar{x} – теоретическое значение.

Величина σ вычисляется на основе данных выборочного наблюдения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \tilde{x})^2}{n}},$$

где x_i – наблюдаемое значение.

Предельная ошибка малой выборки рассчитывается аналогичным образом:

$$\Delta_{me} = tm_{me}$$

Независимо от вида выборки, на заключительном этапе определяются доверительные интервалы, в которых может находиться генеральная средняя (для количественных признаков) или генеральная доля (для качественных признаков). Доверительные интервалы – это область тех значений

генеральной средней, выход за пределы которой имеет весьма малую вероятность. Доверительные интервалы определяются для малой выборки:

$$\tilde{x} - \Delta_{мв} \triangleleft \bar{x} + \Delta_{мв} .$$

Здесь приведен принцип обработки результатов экспериментальных исследований и определения их адекватности при определенном уровне надежной вероятности. На практике для обработки результатов применялся пакет статистической обработки Statistica.

РАЗДЕЛ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты экспериментальных исследований тяговых усилий для легкосуглинистой почвы

4.1.1 Результаты определения механических свойств почвы (грунта)

При проведении экспериментальных исследований с целью определения адекватности полученных теоретических результатов необходимо было определить механические свойства почвы.

Определение механических свойств производилось согласно методике, описанной в п. 3.2.2.

Исходя из полученных ранее регрессионных уравнений [46], были получены модуль упругости и модуль вязкости объемных деформаций, а также значения начального напряжения сдвига почвы (грунта).

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась методами регрессионного анализа с применением пакета статистической обработки и анализа данных “Statistica 6”.

Почва при проведении экспериментальных исследований была определена, как легкосуглинистая.

Влажность в горизонте прохождения рабочего органа (на глубине 0,5 м) составляла $W = 16 \div 18 \%$, плотность почвы $\rho_s = 1350 \div 1400 \text{ кг} / \text{м}^3$.

В результате использования данных экспериментальных исследований с применением регрессионных уравнений связи модуля упругости K_1 , коэффициента вязкости η_1 и начального напряжения сдвига τ_{01} с плотностью ρ_s и влажностью W для легкосуглинистой почвы (грунта) уравнения регрессии имеют вид:

– модуль упругости объемных деформаций:

$$K_1 = 1,64 \cdot 10^7 + 255778W^2 - 6050W\rho_s + 29\rho_s^2. \quad (4.1)$$

С учетом связи между упругими характеристиками, которая выражается через коэффициент бокового расширения (в теории упругости коэффициент Пуассона) ν модуль упругости линейных деформаций $E = 3K_1(1 - 2\nu)$, тогда (4.1) можно записать в виде:

$$E = 3(1 - 2\nu)(1,64 \cdot 10^7 + 255778W^2 - 6050W\rho_s + 29\rho_s^2). \quad (4.1.a)$$

– модуль вязкости объемных деформаций:

$$\mu_1 = 221382 - \frac{514862}{W} + 65,7\rho_s - 4,5W\rho_s \quad (4.2)$$

Аналогично связь сдвигового модуля с объемным выражается

зависимостью $\eta_1 = \frac{3\mu_1(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$. Поэтому переход к модулю вязкости

сдвиговых деформаций приводит к зависимости:

$$\eta_1 = \frac{3\mu_1(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \left(221382 - \frac{514862}{W} + 65,7\rho_s - 4,5W\rho_s \right). \quad (4.2.a)$$

Значение начального напряжения сдвига для легкосуглинистой почвы выражается следующей зависимостью:

$$\tau_{01} = 591.34 + 0.52W^2 + 0.0248W\rho_s + 0.0004\rho_s^2, \quad (4.3)$$

Графически зависимости (4.1.a), (4.2.a) и (4.3) представлены на рисунке 4.1.

Механические свойства почвы (грунта), на котором проводились экспериментальные исследования, полученные по регрессионным зависимостям (4.1) и (4.2), совпадали с определенными по методике п.3.2.2 с надежной вероятностью $P = 0.8$.

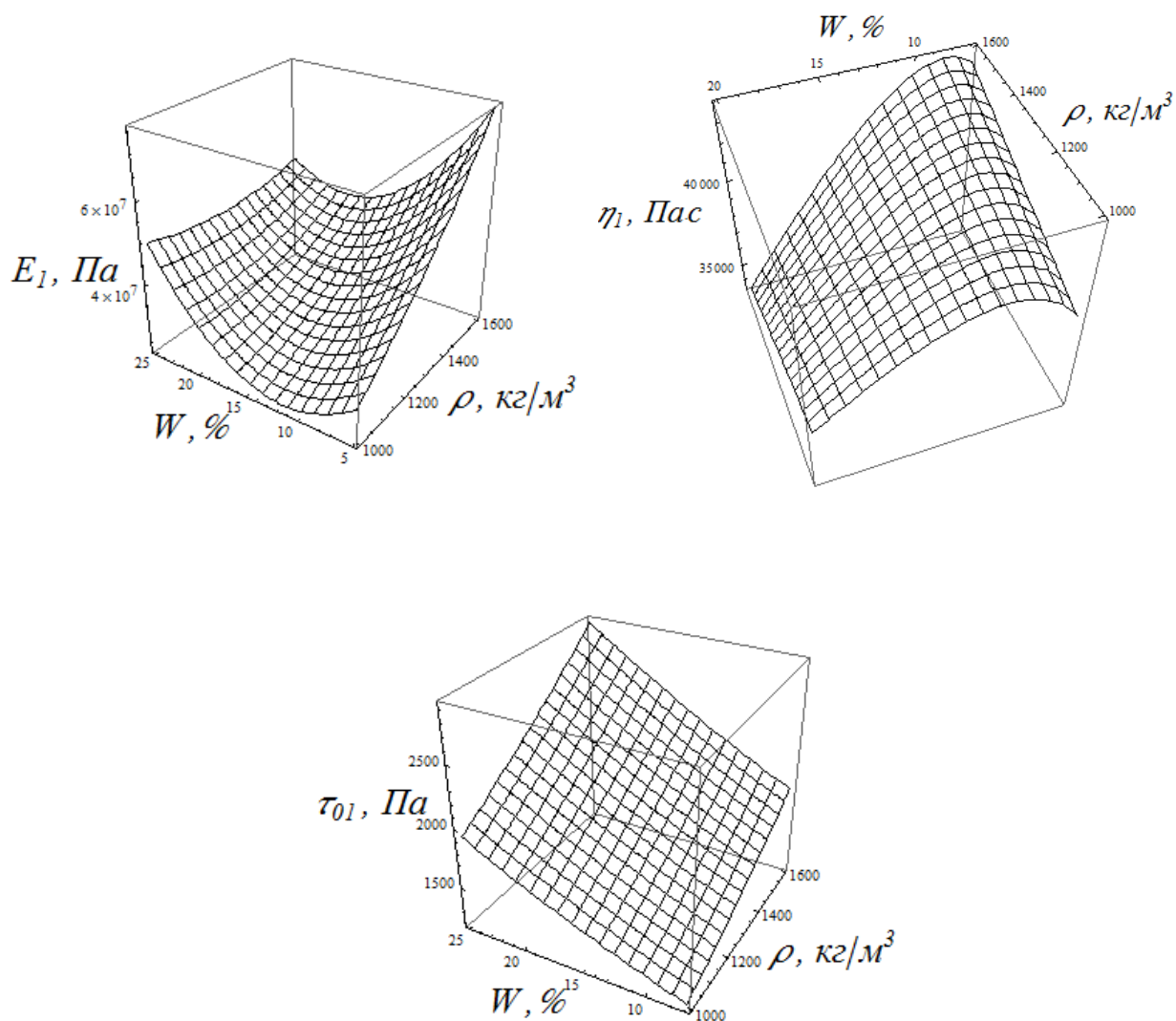


Рис. 4.1 Зависимости модуля упругости линейных деформаций E_1 , модуля вязкости сдвиговых деформаций η_1 и начального напряжения сдвига почвы (грунта) τ_{01} от плотности ρ_s и влажности W для легкосуглинистого грунта

При конкретных значениях плотности и влажности, значения указанных механических величин равнялись:

$$E_1 = 3,626 \cdot 10^7 \text{ Па}, \quad \eta_1 = 37767 \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad \tau_{01} = 2077 \text{ Па}.$$

При таких механических свойствах почвы (грунта) производилось тензометрирование рабочего органа и протяжки оросительной трубы с противофильтрационным экраном.

4.1.2 Результаты определения тяговых усилий для легкосуглинистой почвы

Экспериментальные исследования по определению составляющих тягового усилия для определения адекватности теоретических исследований и проверки работоспособности устройства проводились на экспериментальной базе Национального университета водного хозяйства и природопользования (с. Любомирка Ровенской области). На экспериментальной базе имелись участки легкосуглинистой и среднесуглинистой почвы (грунта).

Методика проведения экспериментальных исследований описана выше. Процесс протягивания оросительной трубы с противофильтрационным экраном и фрагмент раскопки уложенной трубы с экраном представлены на рис. 4.2 и 4.3.

В результате проведения эксперимента были получены численные значения тяговых усилий. На основании этого, согласно методике, приведенной в п. 3.2.3, построили осциллограммы (рис. 4.4 - 4.7).



Рис. 4.2 Начало протягивания трубы оросителя совместно с противофильтрационным экраном



Рис. 4.3 Общий вид уложенной трубы оросителя с противофильтрационным экраном

Результаты обработки результатов динамометрирования, проведенные при экспериментальных исследованиях, показали адекватность полученных теоретических зависимостей сопротивления почвы (грунта) перемещению рабочего органа (сумма зависимостей 2.14.а, 2.22) при уровне значимости $\alpha = 0.15$.

При этом использовался рабочий орган со следующими геометрическими параметрами: $L_i = -B \cos[1/a]$, где $B = 0.3$ – ширина одного лемеха, м; $h = 0.8$ – высота лемеха в зоне соприкосновения с конусной частью, м; $a = -2$ – коэффициент наклона нормали к поверхности лемеха к оси ox , $b = 0.75$, $c = -1.5$ – коэффициенты наклона нормали к поверхности лемеха к осям oy, oz , соответственно. При этом свойства почвы (грунта) были такими: напряжение начального сдвига – $\tau_0 = 2000 \text{ Па}$, коэффициент бокового расширения – $\nu = 0.4$, плотность – $\rho = 1400 \text{ кг} / \text{м}^3$, модуль вязкости сдвиговых деформаций – $\eta_1 = 3.8 \cdot 10^4 \text{ Па с}$, модуль упругости линейных деформаций – $E = 3.63 \cdot 10^7 \text{ Па}$, угол внешнего трения по поверхности лемеха – $\psi = \pi/4$.

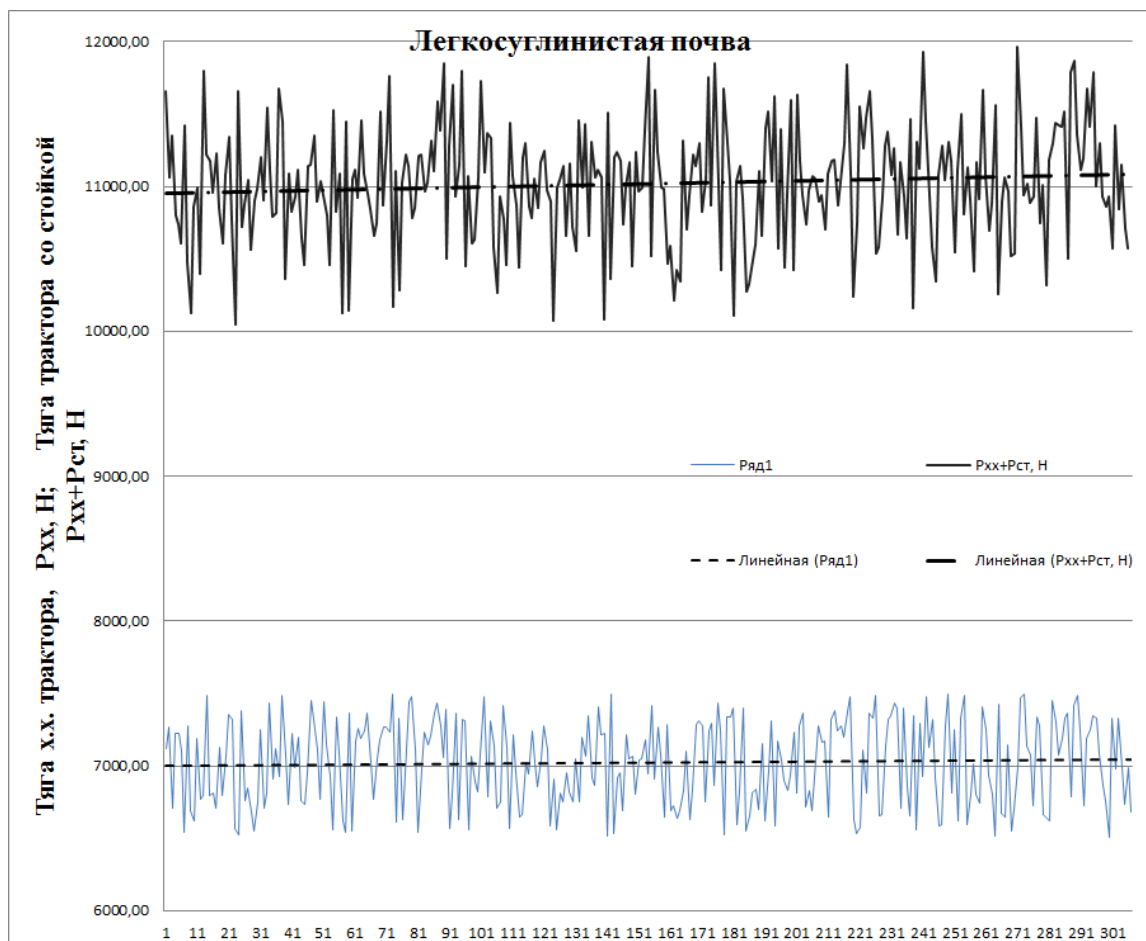


Рис. 4.4 Фрагмент характерных осцилограмм тягового сопротивления: ряд 1 – осцилограмма тягового сопротивления холостого хода буксируемого трактора, 2 – $P_{xx} + P_{СТ}$ осцилограмма тягового сопротивления буксируемого трактора со стойкой крепления рабочего органа, ряды 3, 4 – линейные аппроксимации осцилограмм (ряд 1 и ряд 2) для легкосуглинистой почвы (грунта)

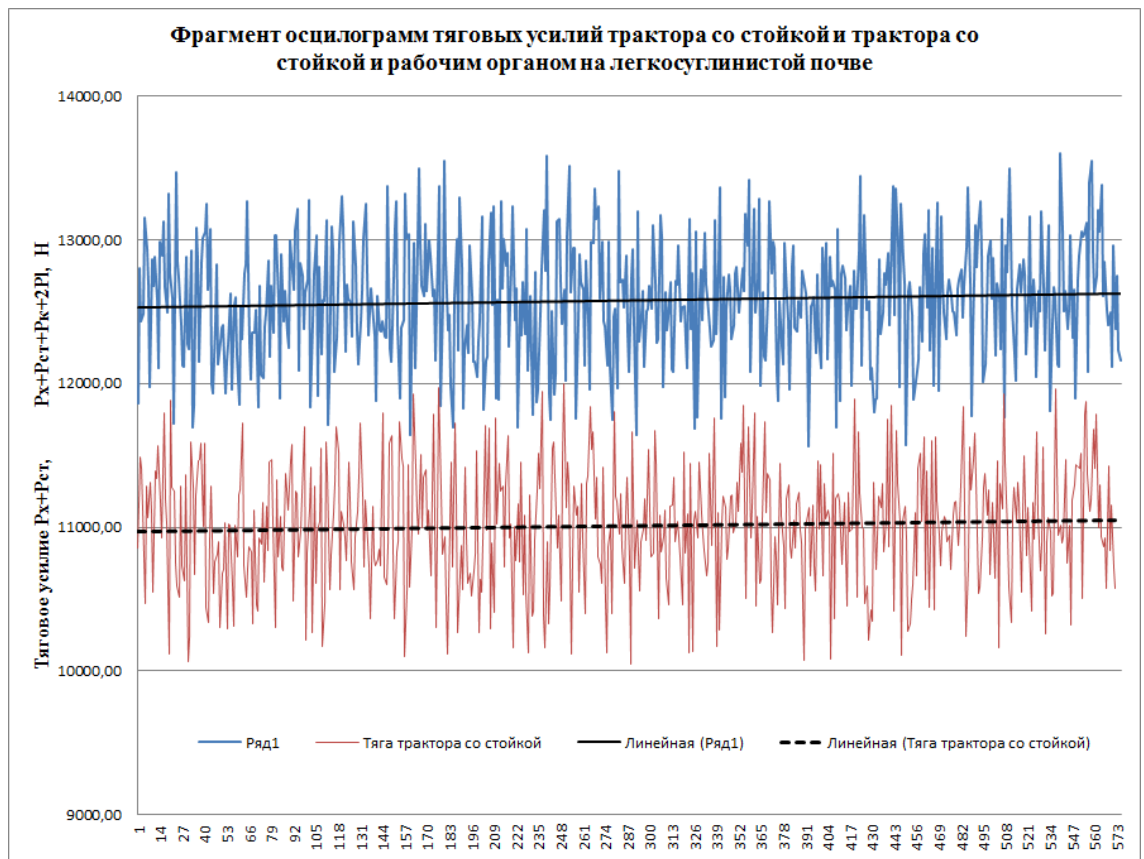


Рис. 4.5 Фрагмент характерных осциллограмм тягового сопротивления рабочего органа (конусная и лемешная часть): ряд 1 – осциллограмма тягового сопротивления холостого хода буксируемого трактора со стойкой и рабочим органом (конусная и лемешная части), 2 – $P_{xx} + P_{CT}$ осциллограмма тягового сопротивления буксируемого трактора со стойкой крепления рабочего органа, ряды 3, 4 – линейные аппроксимации осциллограмм (ряд 1 и ряд 2) для легкосуглинистой почвы (грунта)

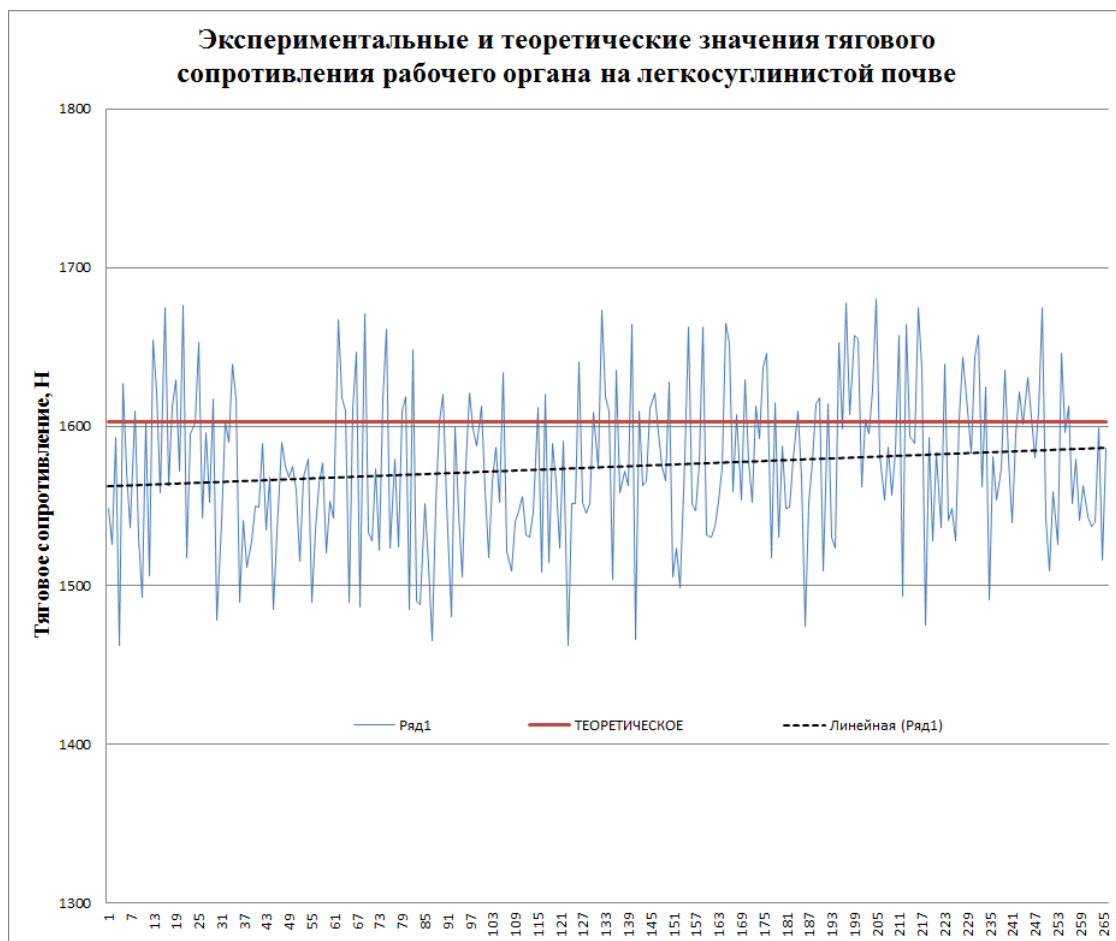


Рис. 4.6 Фрагмент характерной осциллограммы тягового сопротивления рабочего органа (конусная и лемешная часть): ряд 1 – осциллограмма тягового сопротивления рабочего органа (конусная и лемешная части), 2 – теоретическое значение тягового сопротивления рабочего органа (конусная и лемешная часть), ряд 3 – линейная аппроксимация осциллограммы (ряд 1) для легкосуглинистой почвы (грунта)

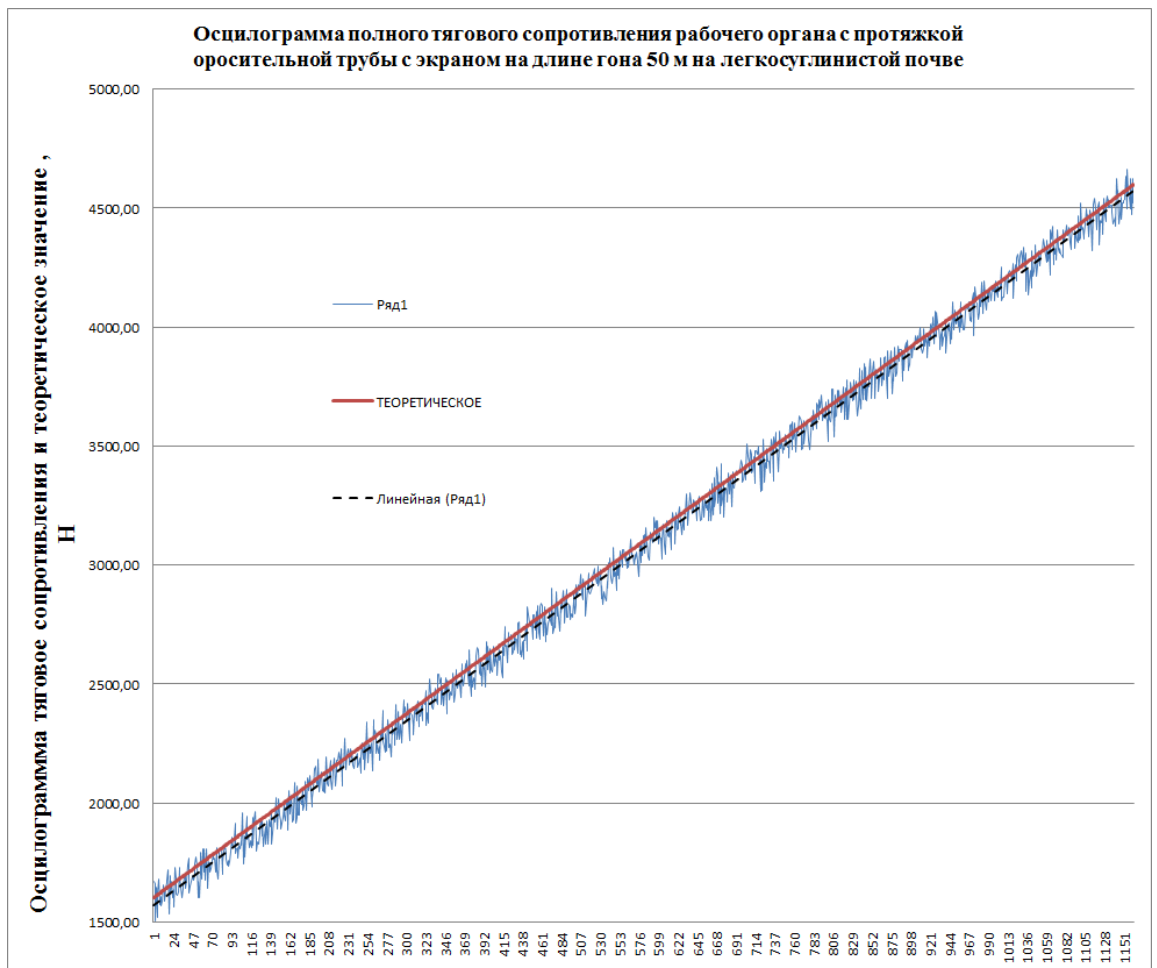


Рис. 4.7 Полная запись тягового сопротивления рабочего органа с протяжкой оросительной трубы и противодиффузионного экрана на длине гона 50 м: ряд 1 – осциллограмма, ряд 2 – теоретическое значение сопротивления, ряд 3 – линейная аппроксимация осциллограммы 1 для легкосуглинистой почвы (грунта)

Результаты определения усилий протягивания оросительной трубы вместе с противодиффузионным экраном, которые находили из теоретических зависимостей 2.27, 2.28 в сумме с зависимостями 2.14.а, 2.22, сопоставлялись с результатами полного усилия протягивания, за исключением сопротивления перекачиванию трактора и сопротивления движению стойки. Результаты теоретических исследований адекватны при уровне значимости $\alpha = 0.15$.

4.2 Результаты экспериментальных исследований тяговых усилий для среднесуглинистой почвы

4.2.1 Результаты определения механических свойств почвы (грунта)

При проведении экспериментальных исследований с целью определения адекватности полученных теоретических результатов определялись механические свойства почвы, согласно методике, описанной в п. 3.2.5.

Исходя из полученных ранее регрессионных уравнений [46], были получены модуль упругости и модуль вязкости объемных деформаций, а также значения начального напряжения сдвига почвы (грунта).

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась методами регрессионного анализа с применением пакета статистической обработки и анализа данных “Statistica 6”.

Почва при проведении экспериментальных исследований была определена, как среднесуглинистая.

Влажность в горизонте прохождения рабочего органа (на глубине 0,5 м) составляла $W = 19 \div 20 \%$, плотность почвы $\rho_s = 1480 \div 1520 \text{ кг} / \text{м}^3$.

В результате использования данных экспериментальных исследований с применением регрессионных уравнений связи модуля упругости K_2 , коэффициента вязкости η_2 и начального напряжения сдвига τ_{02} с плотностью ρ_s и влажностью W для среднесуглинистой почвы (грунта) уравнения регрессии имеют вид:

– модуль упругости объемных деформаций:

$$K_2 = 12.9 \cdot 10^7 + 183156W^2 - 5263W \rho_s + 32\rho_s^2. \quad (4.4)$$

С учетом связи между упругими характеристиками, которая выражается через коэффициент бокового расширения (в теории упругости

коэффициент Пуассона) ν , модуль упругости линейных деформаций $E_2 = 3K_2(1 - 2\nu)$, тогда (4.4) можно записать в виде:

$$E_2 = 3K_2(1 - 2\nu)(12.9 \cdot 10^7 + 183156W^2 - 5263W\rho_s + 32\rho_s^2) \quad (4.4.a)$$

– модуль вязкости объемных деформаций:

$$\mu_2 = 178237 - \frac{445099}{W} + 49.3\rho_s - 0.64W\rho_s \quad (4.5)$$

Аналогично связь сдвигового модуля с объемным выражается зависимостью $\eta_2 = \frac{3\mu_2(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$. Поэтому переход к модулю вязкости сдвиговых деформаций приводит к зависимости:

$$\eta_2 = \frac{3\mu_2(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \left(178237 - \frac{445099}{W} + 49.3\rho_s - 0.64W\rho_s \right) \quad (4.5.a)$$

Значение начального напряжения сдвига для среднесуглинистой почвы выражается следующей зависимостью:

$$\tau_{02} = 991.34 + 1.52W^2 + 0.0651W\rho_s + 0.0007\rho_s^2, \quad (4.6)$$

Графически зависимости (4.2.a), (4.5.a), (4.6) представлены на рисунке 4.8.

Механические свойства почвы (грунта), на которой проводились экспериментальные исследования, полученные по регрессионным зависимостям (4.1) и (4.2), совпадали с определенными по методике п. 3.2.2 с надежной вероятностью $P = 0.8$.

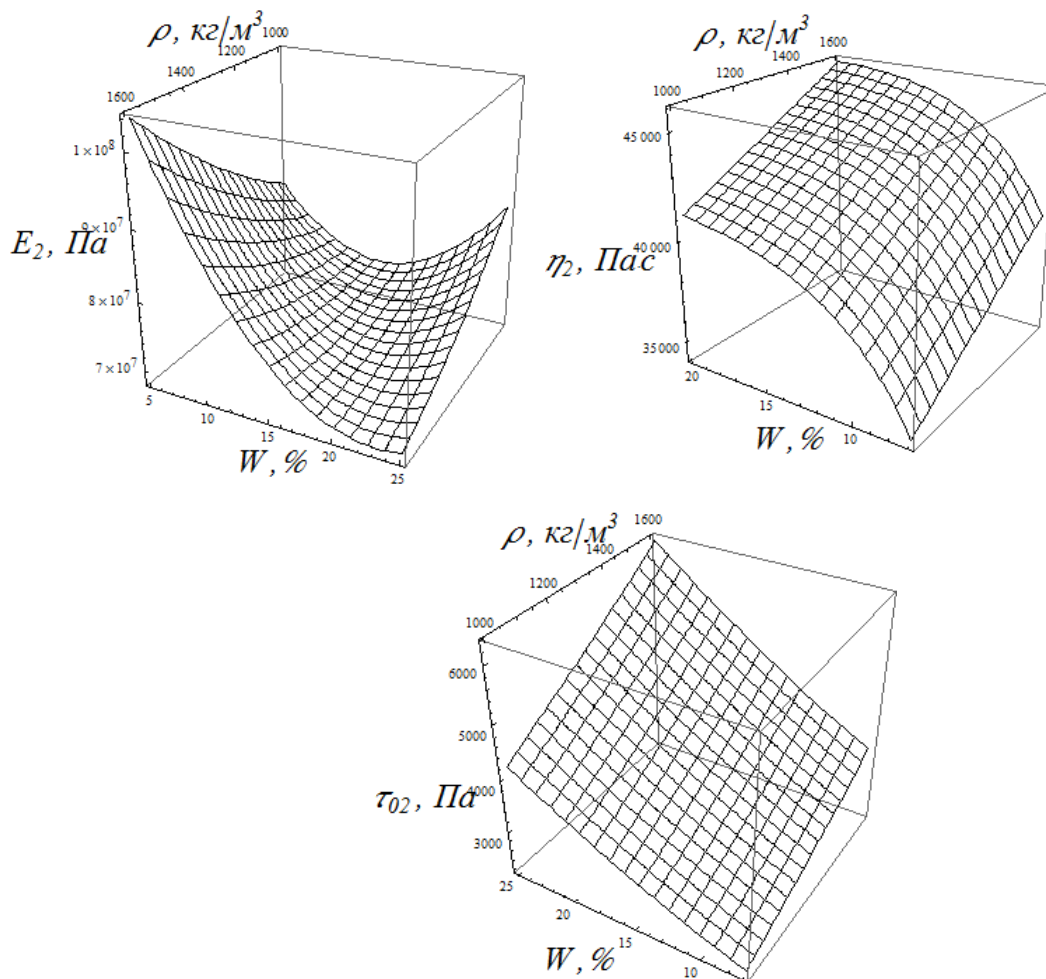


Рис. 4.8 Зависимости модуля упругости линейных деформаций E_2 , модуля вязкости сдвиговых деформаций η_2 и начального напряжения сдвига почвы (грунта) τ_{02} от плотности ρ_s и влажности W для среднесуглинистой почвы (грунта)

При конкретных значениях плотности и влажности, значения указанных механических величин равнялись: $E_2 = 7.02743 \cdot 10^7$ Па, $\eta_2 = 45115$ Па с, $\tau_{02} = 4970$ Па.

При таких механических свойствах почвы (грунта) производилось тензометрирование рабочего органа и тротяжки оросительной трубы с противофильтрационным экраном.

4.2.2 Результаты определения тяговых усилий для среднесуглинистой почвы

Методика проведения экспериментальных исследований по определению тяговых усилий описана выше.

В результате проведения эксперимента были получены численные значения тяговых усилий для среднесуглинистой почвы (грунта). На основании этого, согласно методике, приведенной в п. 3.2.3, построили осцилограммы (рис. 4.9 - 4.12).

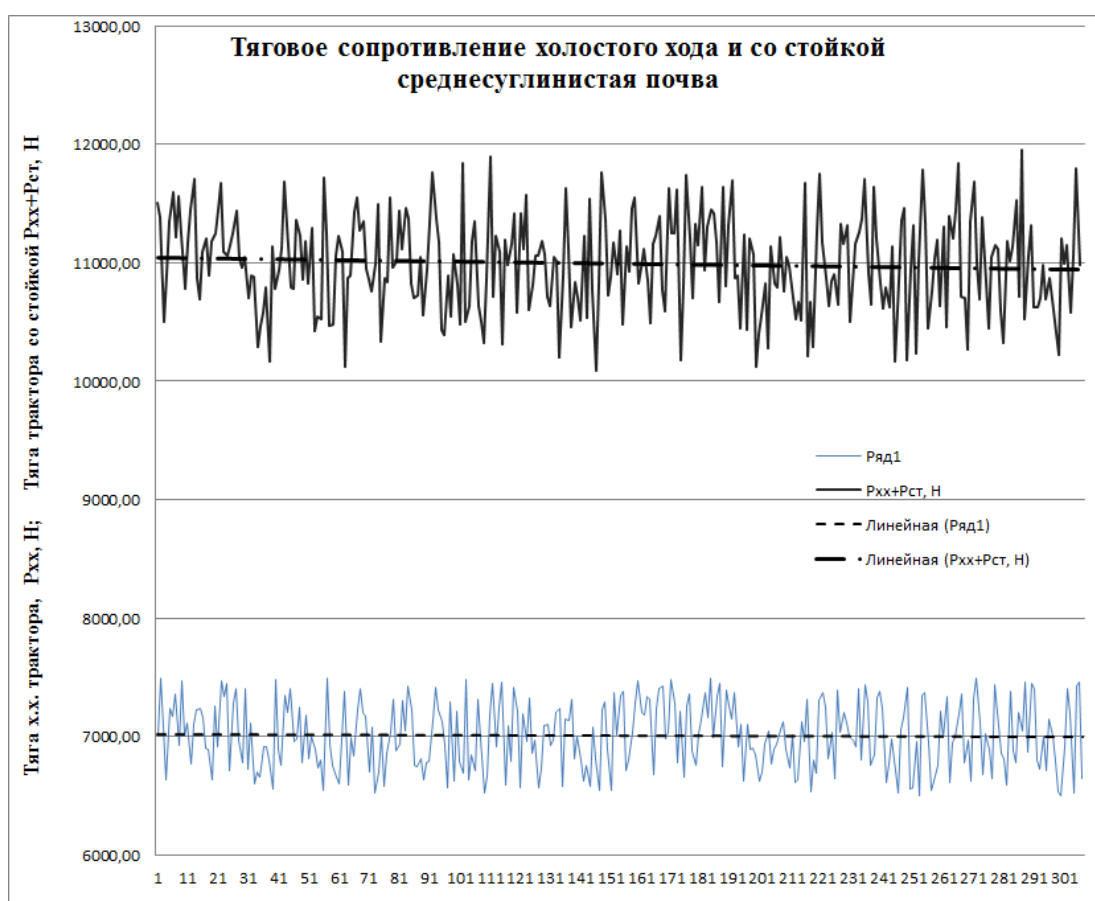


Рис. 4.9 Фрагмент характерных осцилограмм тягового сопротивления: ряд 1 – осцилограмма тягового сопротивления холостого хода буксируемого трактора, 2 – $P_{xx} + P_{CT}$ осцилограмма тягового сопротивления буксируемого

трактора со стойкой крепления рабочего органа, ряды 3, 4 – линейные аппроксимации осцилограмм (ряд 1 и ряд 2) для среднесуглинистой почвы



Рис. 4.10 Фрагмент характерных осцилограмм тягового сопротивления рабочего органа (конусная и лемешная часть): ряд 1 – осцилограмма тягового сопротивления холостого хода буксируемого трактора со стойкой и рабочим органом (конусная и лемешная части), 2 – $P_{xx} + P_{CT}$ осцилограмма тягового сопротивления буксируемого трактора со стойкой крепления рабочего органа, ряды 3, 4 – линейные аппроксимации осцилограмм (ряд 1 и ряд 2) для среднесуглинистой почвы (грунта)

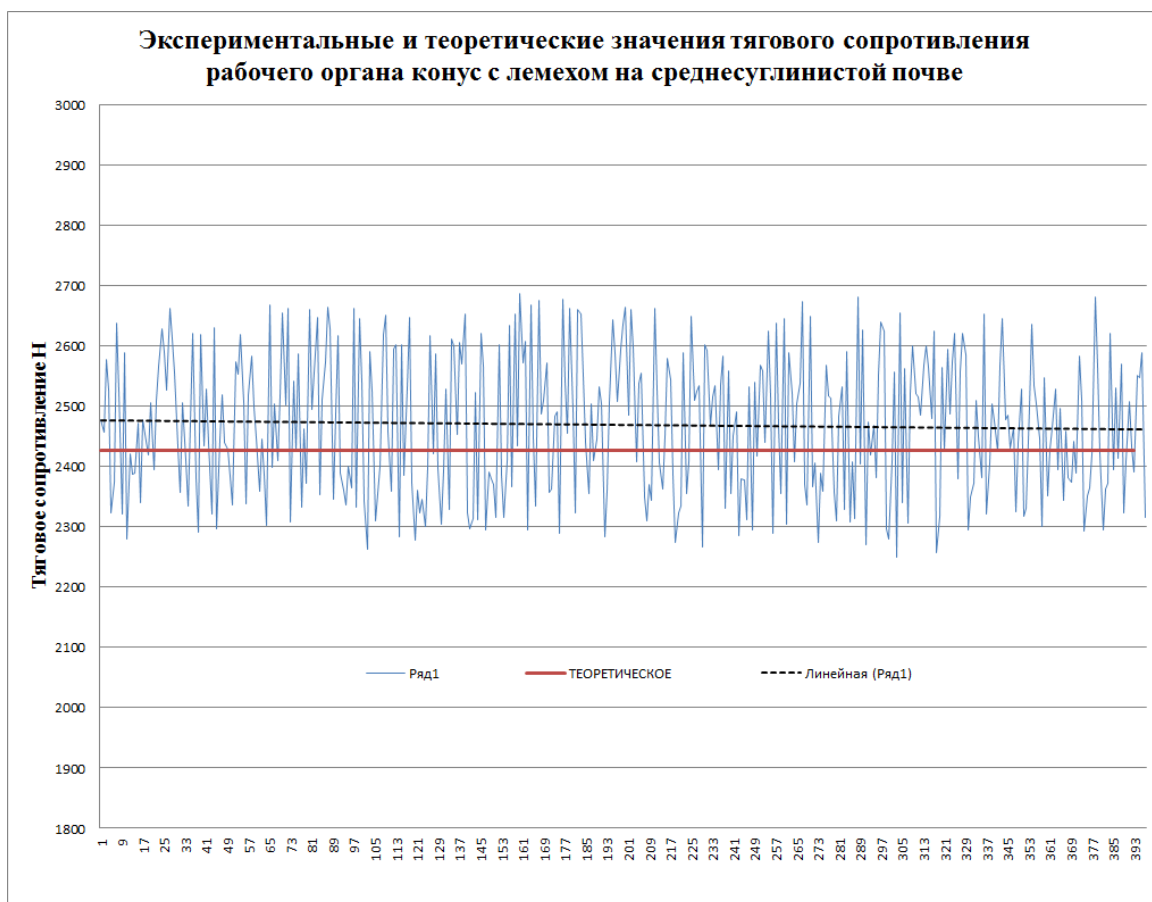


Рис. 4.11 Фрагмент характерной осциллограммы тягового сопротивления рабочего органа (конусная и лемешная часть): ряд 1 – осциллограмма тягового сопротивления рабочего органа (конусная и лемешная части), 2 – теоретическое значение тягового сопротивления рабочего органа (конусная и лемешная часть), ряд 3 – линейная аппроксимация осциллограммы (ряд 1) для среднесуглинистой почвы (грунта)

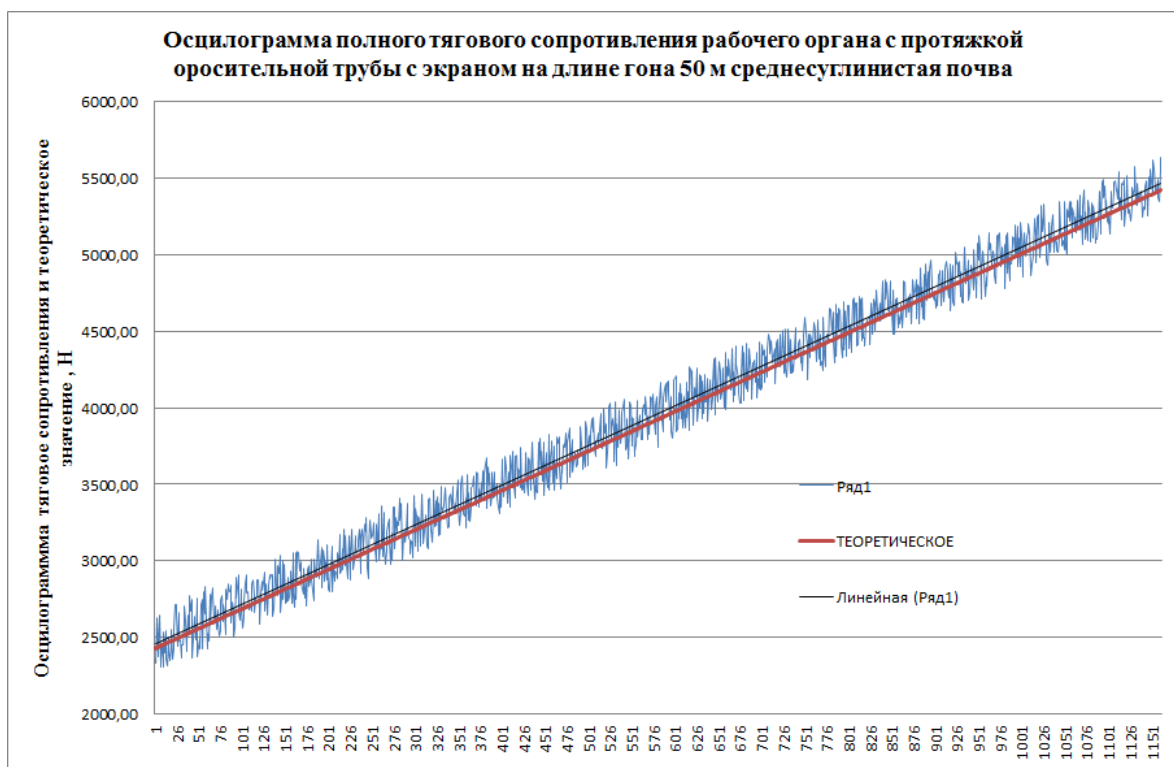


Рис. 4.12 Полная запись тягового сопротивления рабочего органа с протяжкой оросительной трубы и противофильтрационного экрана на длине гона 50 м: ряд 1 – осциллограмма, ряд 2 – теоретическое значение сопротивления, ряд 3 – линейная аппроксимация осциллограммы 1 для среднесуглинистой почвы (грунта)

Результаты обработки результатов динамометрирования, проведенные при экспериментальных исследованиях, проводимых на среднесуглинистой почве (грунте), показали адекватность полученных теоретических зависимостей сопротивления почвы (грунта) перемещению рабочего органа (сумма зависимостей 2.14.а, 2.22) при уровне значимости $\alpha = 0.15$.

При этом использовался рабочий орган со следующими геометрическими параметрами: $L_l = -B \text{Cos}[1/a]$, где $B = 0.3$ – ширина одного лемеха, м; $h = 0.8$ – высота лемеха в зоне соприкосновения с конусной частью, м; $a = -2$ – коэффициент наклона нормали к поверхности

лемеха к оси ox , $b = 0.75$, $c = -1.5$ – коэффициенты наклона нормали к поверхности лемеха к осям oy , oz , соответственно.

При этом свойства почвы (грунта) были такими: напряжение начального сдвига – $\tau_{02} = 4970$ Па, коэффициент бокового расширения – $\nu = 0.4$, плотность – $\rho = 1500 \text{ кг} / \text{м}^3$, модуль вязкости сдвиговых деформаций – $\eta_2 = 45115$ Па с, модуль упругости линейных деформаций – $E_2 = 7.02743 \cdot 10^7$ Па, угол внешнего трения по поверхности лемеха – $\psi = \pi/4$.

Результаты определения усилий протягивания оросительной трубы вместе с противофильтрационным экраном, которые находили из теоретических зависимостей 2.27, 2.28 в сумме с зависимостями 2.14.а, 2.22, сопоставлялись с результатами полного усилия протягивания, за исключением сопротивления перекачиванию трактора и сопротивления движению стойки. Результаты теоретических исследований адекватны при уровне значимости $\alpha = 0.15$.

РАЗДЕЛ 5. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УКЛАДКИ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ С ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫМ ЭКРАНОМ

5.1 Исходные данные для определения технико-экономической эффективности

Для определения затрат энергии для бестраншейной прокладки оросительной трубы с противofильтрационным экраном была определена работа прокладки для участка длиной 50 м по результатам тензометрирования рабочего органа и расхода энергии на протягивание стойки рабочего органа и перекачивание трактора по полю.

Для сравнения выбраны два варианта укладки оросительной трубы с противofильтрационным экраном: традиционное строительство оросительной системы (базовая технология) и с использованием разработанного устройства.

Традиционное строительство оросительной системы состоит из последовательных операций:

- отрывания траншеи на глубину укладки оросителя с планировкой поверхности дна траншеи, при этом ширина отрытой траншеи должна немного превышать ширину укладки противofильтрационного экрана;
- укладка нижней противofильтрационной пленки экрана;
- укладка оросительной трубы;
- покрытие этой трубы верхней частью противofильтрационной пленки;
- закрытие траншеи грунтом.

Второй вариант – с использованием разработанного устройства, – предусматривает выполнение следующих операций:

- агрегатирование устройства с тяговым энергосредством;
- закрепление трубы оросителя на устройстве;
- закрепление двух частей пленок противofильтрационного экрана на устройстве;

- образование полости на глубине заложения оросителя;
- протаскивание в грунте системы оросительной трубы с частями противofильтрационного экрана бестраншейным способом.

5.2 Сравнительный анализ предлагаемого устройства с базовой технологией

Для сравнения энергетических затрат применения двух способов принимались одинаковые условия по механическому составу почвы, а именно легкосуглинистая и среднесуглинистая почвы.

Условия проведения сравнений и показатели расхода энергии и топлива для двух вариантов приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Сравнительный анализ способов укладки оросительной трубы с противofильтрационным экраном по затратам энергии и топлива

№ п.п.	Название показателя, единица измерения	Базовая машина – экскаватор ковшовый ЕО 2621	Агрегат с предлагаемым устр-вом – трактор ДТ 75м + устройство
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	Глубина укладки оросительной трубы (глубина траншеи), м	0,5	0,5
2	Ширина экрана (ширина траншеи), м	0,6	0,6
3	Длина оросительной трубы, м	50	50
4	Скорость прохождения, м/с	0,02	1
5	Удельные затраты топлива двигателем энергосредства, г/кВт с	0,062	0,070
6	Модуль упругости почвы, Па (легкосугл./среднесугл.)	$3,63 \cdot 10^7 / 7,00 \cdot 10^7$	$3,63 \cdot 10^7 / 7,00 \cdot 10^7$

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4
7	Модуль вязкости почвы, Па с (легкосугл./среднесугл.)	3,8 10 ⁴ / 4,5 10 ⁴	3,8 10 ⁴ / 4,5 10 ⁴
8	Плотность почвы, кг/м ³ (легкосугл./среднесугл.)	1250/ 1400	1250/ 1400
9	Затраты энергии, кДж (легкосугл./среднесугл.)		243 10 ³ / 344 10 ³
10	Максимальная потребительная мощность, кВт (легкосугл./среднесугл.)		48,6/ 68,85
10	Затраты топлива на укладку 50 м оросителя, кг (легкосугл./среднесугл.)	4,65	1,150/ 1,630
11	Разница по затратам топлива (легкосугл./среднесугл.)		75 % / 65 %

Анализ таблицы дает основания сделать вывод, что эффективность использования предложенного устройства в сравнении с традиционной укладкой оросительной системы с использованием экскаватора, в зависимости от свойств почвы, составляет 65 % – 75 % только по экономии топлива.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе проанализированы оптимальные способы укладки внутрипочвенных оросительных систем, которые позволили определить рациональное техническое решение для их создания. Решены задачи, связанные с нахождением рациональных параметров и режимов работы рабочего органа для бестраншейной укладки оросительной трубы совместно с противofильтрационным экраном.

1. Анализ результатов исследований распространения жидкости в почве при условии угрозы засоления почвы и в условиях повышенного испарения влаги с поверхности почвы позволил сделать вывод о наиболее рациональном способе создания оросительных сетей. При этом на основе проведенного анализа внутрипочвенного полива можно сделать вывод о том, что оросители для многолетних плодовых насаждений могут укладываться с шагом до 2 метров на глубину около 0,5 метра.

2. Результаты изучения закономерностей передвижения влаги в почве (грунте) при внутрипочвенном орошении позволяют сделать вывод о том, что наибольшее распространение влаги в перпендикулярном направлении от оси оросителя будет обеспечиваться за счет диффузионного переноса влаги при минимально возможных процессах фильтрации, которые возможны при полном влагонасыщении. Это обуславливает необходимость использования противofильтрационного экрана.

3. Анализ способов укладки внутрипочвенных оросительных систем с противofильтрационным экраном позволил сделать вывод об отсутствии технических средств для выполнения такой операции бестраншейным способом.

4. Наиболее адекватным, с точки зрения формализации взаимодействия рабочего органа для бестраншейной укладки оросительной трубы совместно с противofильтрационным экраном, есть представление почвы (грунта) как квазисплошной изотропной среды со свойствами упругости и вязкости.

5. На основе решения контактной задачи взаимодействия конусной части рабочего органа определены ее рациональные геометрические параметры, которые в максимальной степени уплотняют стенки образываемой полости и обеспечивают минимум сопротивления почвы (грунта) ее перемещению. Так, для большинства почв (грунтов) по механическим характеристикам наиболее рациональными будут следующие геометрические параметры конусной части рабочего органа: заострение $a \approx 0.02$, радиус основания конуса $r \approx 1.1r_t$, где r_t – радиус трубы оросителя, при скорости движения $V_m \approx 1 \text{ м/с}$.

6. На основе решения контактной задачи взаимодействия лемешной части рабочего органа определены ее рациональные геометрические параметры, которые в максимальной степени уплотняют стенки образываемой полости и обеспечивают минимум сопротивления почвы (грунта) ее перемещению. Для большинства почв (грунтов) по механическим характеристикам наиболее рациональными являются следующие геометрические параметры лемешной части рабочего органа. Лемех может быть выполнен в виде плоскости с минимально возможными коэффициентами наклонов нормали к поверхности к осям координат: $oy - b < 1$, $oz - c < -1$, $ox - a \rightarrow -2$ и геометрическим размером лемеха, который несколько превышает полуширину противифльтрационного экрана 0,25 метра, при этом высота проекции лемеха на вертикально-поперечную плоскость в зоне соприкосновения с конусной частью составляет величину $r \approx 1.1r_t$.

7. В результате проведенных теоретических исследований получены аналитические зависимости сил сопротивления почвы (грунта) передвижению рабочего органа, которые зависят от геометрических параметров рабочего органа, скорости его перемещения и механических свойств почвы (грунта).

8. Анализируя величины критических напряжений Kkr в верхней части полости, образованной лемешной частью рабочего органа, созданных весом клина почвы (грунта) над полостью, и критическими напряжениями k_1 , созданными в верхней части полости лемешной частью рабочего органа при различных его параметрах и свойствах почвы (грунта), позволяет судить о том, что верхняя часть полости является устойчивой против разрушения и не должна препятствовать протяжке противofильтрационного экрана.

9. Адекватность полученных теоретических зависимостей сопротивления перемещению рабочего органа в почве (грунте) и сопротивлений протяжки оросительной трубы совместно с противofильтрационным экраном с результатами экспериментальных исследований на двух типах почв позволяет судить об адекватности теоретических результатов на статистическом уровне значимости $\alpha = 0.25$.

10. Эффективность использования предлагаемого устройства в сравнении с традиционной укладкой оросительной системы с использованием экскаватора в зависимости от свойств почвы составляет 65 % – 75 % только по экономии топлива.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдель Азим, М. М. Совершенствование методов расчета капельного орошения плодовых культур в условиях Египта: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / М. М. Абдель Азим. – Москва, 2010. – 23 с.
2. Аверьянов, С. Ф. Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания в них воздуха / С. Ф. Аверьянов // ДАН СССР. – 1949. – т.69. №2. – С. 141-144.
3. Акутнева, Е. В. Применение внутрпочвенного орошения в плодоводстве / Е. В. Акутнева // International Scientific Journal Theoretical & Applied Science. – 2014. – Issue: 10. – Vol. 18.
4. Айдаров, А. П. Теоретические и экспериментальные исследования влагопереноса при внутрпочвенном и капельном орошении / А. П. Айдаров, А. А. Алексашенко // Оптимизация процессов комплексного мелиоративного регулирования: Сб. научн. тр. МГМН. – М., 1985. – С. 3-12.
5. Аржаных, А. И. Исследование и обоснование параметров рабочих органов дисковых культиваторов для повышенных скоростей: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.04.10 / А. И. Аржаных. – Челябинск, 1968. – 24 с.
6. Арст, В. Х. Техника локального орошения сада в предгорных районах юго-востока Казахстана: автореф. дисс. канд. техн. наук: 06.01.02 / В. Х. Арст. – Алма-Ата, 1985. – 22 с.
7. Артемьева, З. Н. Техничко-экономическая оценка строительства пластмассового дренажа бестраншейным способом / З. Н. Артемьева, Р. А. Неврова // Сб. научн. тр. Сев.НИИГиМ-Л. – 1982. – С. 145 – 151.
8. Артюхин, Ю. Н. Строительство бестраншейного дренажа / Ю. Н. Артюхин, А.М. Смирнов, Н.Н. Ковальчук. – М. : Агропромиздат, 1987. – 84 с.
9. А. с. 471093 СССР, МКИ А 01 25/02. Увлажнитель для подпочвенного орошения / В. Г. Лабода; Укр. НИИ гидротехники и мелиорации. – 1975.
10. А. с. 1678989 СССР, МКИЗ Е 02 F 5/10. Рабочий орган бестраншейного дренаукладчика / А. Л. Романовский, С. В. Кравец, В. Ф.

Ткачук, Л. Б. Кравець и др. (СССР). – № 3704028/03; заявл. 19.12.83; опубл. 23.09.91, Бюл. № 35.

11. А. с. 1694792 СССР, МКИЗ Е 02 F 5/10. Землеройный рабочий орган бестраншейного дренажера / А. Л. Романовский, С. В. Кравец, В. Ф. Ткачук и др. (СССР). – № 4018607/03; заявл. 24.12.85; опубл. 30.11.91, Бюл. № 44.

12. Астапов, С. В. Подпочвенно-кротовый способ полива в Центральной черноземной зоне / С. В. Астапов, В. И. Бобченко // Гидротехника и мелиорация. – 1950. – № 9. – С. 41-52.

13. Ахмедов, Аскар Джангир – оглы. Технология внутрипочвенного орошения люцерны на зеленый корм в Волго - Ахтубинской пойме: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. / Аскар Джангир – оглы Ахмедов. – М., 1996. – 23 с.

14. Ахмедов, А. Д. Аналитический подход к определению некоторых водно-физических характеристик почвогрунтов / А. Д. Ахмедов // Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов: Материалы международной научно-практической конференции. – Москва, 2008. – С. 105-109.

15. Багиров, И. З. Исследование деформации и сопротивлений грунта с клином при различных скоростях / И. З. Багиров. Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11. – Минск: ВНИИ земледелия, 1963. – 24 с.

16. Багров, М. Н. Прогрессивная технология орошения сельскохозяйственных культур / М. Н. Багров, И. О. Кружилин. – М.: Колос, 1980. – С. 20-42.

17. Барашков, В. И. Исследования техники подпочвенного орошения по трубчатым увлажнителям на светло-каштановых почвах: дисс. ... канд. тех. наук: 06.01.02. / В. И. Барашков. – Волгоград, 1980. - С. 40-86.

18. Бердышев, В. Д. Развитие научных работ в области подпочвенного орошения / В. Д. Бердышев, А. Ф. Радько, Г. Ю. Шейкин // Обзорная информация. – М.: ЦБНТИ Минводхоза, 1976. – 48 с.

19. Бестраншейные дренажники в СССР и за рубежом / Е. Д. Томин, А. Н. Ефремов, Б. И. Люлькин, В. Н. Буравцев. – М.: ЦБНТИ Минводхоз СССР, 1983. – №13. – С. 84.
20. Бирюков, Н. С. Методическое пособие по определению физико-механических свойств грунтов / Бирюков Н. С., Козарновский В. Д., Мотылев Ю. Л. – М. : Недра, 1975. - 177 с.
21. Бледных, В. В. Математическая модель рабочей поверхности корпуса плуга / В. В. Бледных, С. Я. Худяков // Техника в сельском хозяйстве – 1989. – № 2. – С. 10–12.
22. Бобченко, В. И. Подпочвенное орошение / В. И. Бобченко. – М.: Гос. изд. с.-х. лит, 1957. – 127 с.
23. Богушевский, А. А. Подпочвенное орошение: дисс. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / А. А. Богушевский. – М., 1955. – С. 37-143.
24. Боровой, Е. П. Научное обоснование техники и технологии внутрипочвенного орошения кормовых культур: дисс канд. с.-х. наук: 06.01.02 / Е. П. Боровой. – Волгоград, 1999. – 413 с.
25. Боровой, Е. П. Зависимость расхода воды в увлажнителях от напора и конструкции при внутрипочвенном орошении / Е. П. Боровой // Тезисы докладов научн. - практ. конф. Саратовского СХИ, Саратов, 1989. – С. 73-78.
26. Боровой, Е. П. Формирование контура увлажнения в зависимости от конструкции увлажнителя и поливной нормы / Е. П. Боровой // Материалы конференции молодых ученых: Волгоградский СХИ. – Волгоград, 1986. – С. 154-155.
27. Будаговский, А. И. Впитывание воды в почву /А. И. Будаговский. – М.: Изд. АН СССР, 1955. – С. 25-85.
28. Веприков, В. И. Математическая модель технологии обеспечения радиационной безопасности при поливе почвы малыми дифференцированными нормами в санитарно-защитной зоне АЭС / В. И.

Веприков, Ю. В. Веприков, Ю. В. Веприкова // Глобальная ядерная безопасность, 2015. – № 3 (16), С. 9.

29. Ветренко, Е. А. Расчет влагопереноса при ВПО с учетом влагоотбора корнями растений / Е. А. Ветренко // Актуальные проблемы экологии в условиях современного мира: Материалы II Международной научно-практической конференции. – Майкоп, 2002. – С. 67-69.

30. Ветренко, Е. А. Научно-экспериментальное обоснование внутрипочвенного орошения яблоневого сада: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 06.01.02. / Е. А. Ветренко. – Волгоград, 2003. – 23 с.

31. Ветров Ю. А. Машины для специальных земляных работ / Ю. А. Ветров, В. Л. Баладинский – К. : Вища школа, 1980. – 190 с.

32. Воронин, А. Д. Основы физики почв / А. Д. Воронин. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1986. – 244 с.

33. Воронина, Г. И. О распределении влаги в контуре увлажнения при подпочвенном орошении / Г. И. Воронина // Вопросы водного хозяйства (орошение). – Фрунзе, 1973. – Вып. 31. – С. 43-46.

34. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высш. школа, 1978 – 447 с.

35. Глобус, А. М. Экспериментальная гидрофизика почв / А. М. Глобус. – Л: Гидрометеиздат, 1969. – 357 с.

36. Гостищев, Д. П. Математическое моделирование влагопереноса при внутрипочвенном орошении / Д. П. Гостищев, Ю. С. Рогозина // Обзорная информация. – М.: ЦБНТИ Минводстроя СССР, 1990. – С. 43–46.

37. Григоров, М. С. Внутрипочвенное орошение / М. С. Григоров. – М.: Колос, 1983. – 128 с.

38. Григоров, М. С. Особенности передвижения влаги в почве при внутрипочвенном орошении / М. С. Григоров, Е. П. Боровой // Сб. научн. тр. Прогрессивные технологии орошения сельскохозяйственных культур. – Волгоградский СХИ: Волгоград, 1989. – С. 15-23.

39. Григоров, М. С. Боровой Е. П., Ходяков Е. А. Заиляемость увлажнительной сети при внутрпочвенном орошении / М. С. Григоров, Е. П. Боровой, Е. А. Ходяков // Гидротехническое строительство, водное хозяйство и мелиорация земель на современном этапе. Международная научно - практич. конф.: Пенза, 1999. – С. 19-26.
40. Декруа, М. Различные методы локального орошения, применяемые во Франции / М. Декруа // Сб. «Прогрессивные способы орошения, включая машинное орошение». – М: Минводхоз СССР, 1975. – С.58-76.
41. Дженике, Э. В. Складирование и выпуск сыпучих материалов / Э. В. Дженике. – М.: Мир, 1968. – 164 с.
42. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. – Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – 568 с.
43. Долгов, С. И. Исследования подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений / С. И. Долгов. – М. – Д.: Изд. АН СССР, 1948. – С. 144-197.
44. Долматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Б.И. Долматов. – Л. : Стройиздат, 1988. – 415 с.
45. Дубровин, В. Состояние проблемы и необходимость разработки комплекса оборудования для полива винограда при выращивании в природно-климатических зонах Ирака / В. Дубровин, А. Броварец, Аль-Хазаали Хайдер Раад Надим // Motrol Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Vol. 16. – №3. – 2014. – P. 202-207.
- 45а. Дубровин, В. А. Екологія вирощування винограду / В. А. Дубровин, А. А. Броварець, Аль-Хазаали Хайдер Раад Надим // Науковий вісник НУБіП України. – 2014. – № 196, Ч. 1. – С. 13-21.
46. Духовный, В. А. Горизонтальный дренаж орошаемых земель / В. А. Духовный, М. Б. Беклушин, Е. Д. Томин, Ф. В. Серебренников. – М.: Колос, 1979. – 255 с.

47. Ермилов, А. Б. Математическая модель усилия глубокого резания грунта узкими ножами / А. Б. Ермилов, А. Н. Шаламов // Моск. автомоб.-дорожный ин-т. – М., 1983. – 21 с.
48. Завьялов, А. М. Основы теории взаимодействия рабочих органов дорожно-строительных машин с грунтом / А. М. Завьялов. – СибАДИ. – Омск, 1992. – 192 с.
49. Зеленин, А. Н. Косое резание и копание грунта / А. Н. Зеленин, Л. В. Красильников // Строительные и дорожные машины. – М.: Машиностроение, 1967. – №4. – С. 15-22.
50. Зеленин, А. Н. Машины для земляных работ / А. Н. Зеленин, В. И. Баловнев, И. П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
51. Золотаревская, Д. И. Основы теории и методы расчета уплотняющего воздействия на почву колесных движителей мобильной сельскохозяйственной техники: дисс доктора техн. наук: 05.20.01. / Д. И. Золотаревская. – Москва, – 1997. – 432 с.
52. Игнатенко, И. В. Обобщение динамической модели взаимодействия рабочего органа с почвой / И. В. Игнатенко // Комплексная механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1985. – С. 57–66.
53. Казаков, В. С. Бестраншейные дренажники / В. С. Казаков. – М.: Россельхозиздат, 1974. – 62 с.
54. Казаков, В. С. Бестраншейный и узкотраншейный дренаж / В. С. Казаков. – М. : Россельхозиздат, 1986. – 70 с.
55. Каслин, Н. Д. Механизация работ при прокладке распределительных трубопроводов / Н. Д. Каслин, В. Н. Супонев // Вестник ХНАДУ. – Харьков, 2007. – Вып 38. – С. 107 – 110.
56. Качинский, Н. А. Влияние тракторной обработки на физические свойства почвы / Качинский Н. А. // Труды Государствен. Почвен. Ин-та, отдельный оттиск из выпуска №1. – М., 1927. – С. 32-38.

57. Кичигин, В. Н. Подпочвенное орошение (классификационная схема и характеристика систем подпочвенного орошения) / В. Н. Кичигин. – Кишинев: Партийное изд. ЦК КП Молдавии, 1962. – 31 с.
58. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н. И. Кленин, В. А. Сакун. – М.: Колос, 1980. – 671 с.
59. Ковбаса, В. П. Механіко-технологічне обґрунтування оптимізації взаємодії робочих органів з ґрунтом: дис ...докт. техн. наук: 05.05.11 / В. П. Ковбаса. – К., 2006. – 299 с.
60. Ковбаса, В. П. Моделирование распределения напряжений в почве под действием деформаторов / В. П. Ковбаса // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. – 2001. – Вип. 2. – т. 16. – С. 123–127.
61. Ковбаса, В. П. Залежності реологічних властивостей ґрунту від параметрів його стану / В. П. Ковбаса, Д. Г. Войтюк, Ю. О. Гуменюк // Промислова гідравліка і пневматика. – 2005. – № 8. – С. 25–28.
62. Ковбаса, В. П. Розподіл напружень у сипкому середовищі, обмеженому стінками споруди силосного типу / В. П. Ковбаса, В. В. Ярошенко // Науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». – Кіровоград, 2010. – Вип. 40. – Ч. 1. – С. 314-324.
63. Ковбаса, В. П. Критерій міцності і співвідношення між компонентами напружень сипучого середовища / В. П. Ковбаса, В. П. Курка, Али Ахмед Кадем // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: «Техніка та енергетика АПК». – К., 2015. – Вип. 212. – ч. 1. – С. 196-203.
64. Ковбаса, В. П. Про подолання труднощів при вирішенні контактних задач пружності / В. П. Ковбаса, В. П. Курка, Али Ахмед Кадем // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 32. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – С. 79-86.

65. Козішкурт, М. Є. Об'ємна щільність – індикатор агрофізичного стану та аргумент функції агрогідрологічних властивостей ґрунтів / М. Є. Козішкурт, С. М. Козішкурт, Л. М. Голота // Вісник Національного університету водного господарства і природокористування : зб. наук. пр. – Рівне, 2011. – Вип. 2 (47), ч. 1. – С. 300–308.
66. Копьев, Е. И. Гидравлический расчет работы поливных кротовин / Е. И. Копьев // Сб. научн. тр. ВНИИГиМ. М., 1960. – Т. 35. – С. 120-129.
67. Корнев, В. Г. Подпочвенное орошение / В. Г. Корнев. – М. - Л.: Сельхозгиз, 1935. – С. 13-83.
68. Кострицын, А. К. Основные закономерности сопротивления почвы деформации и разрушению и их исследование для обоснования типа и параметров почвообрабатывающих противоэрозионных рабочих органов / А. К. Кострицын. – дис... докт. техн. наук: 05.20.01. – М., 1986. – 356 с.
69. Костяков, А. Н. Основы мелиорации / А. Н. Костяков. – М.: Госсельхозиздат, 1960. – 622 с.
70. Кравец, С. В. Аналитический метод определения продольного профиля режущей части двухступенчатого грунтообрабатывающего органа / С. В. Кравец, А. А. Нечидюк // Горн., строит., дор. и мелиорат. машины: Респ. межвед. научн.-техн. сб. – К.: Техніка, 1991. – Вып. 44. – С. 39 – 45.
71. Кравец, С. В. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций / С. В. Кравец, Н. Д. Каслин, В. К. Руднев, В. Н. Супонев. – Харьков: ООО “Фавор”, 2008. – 256 с.
72. Кравец, С. В. Вплив багатоярусного розпушення на водно-фізичні властивості ґрунтів / С. В. Кравец, В. Ф. Ткачук, О. П. Рижий // Зб. статей за мат. III наук.-техн. конференції. – ч. 4; «Механізація і автоматизація». – Рівне: УДАВГ, 1997. – С. 16 – 17.
73. Кравец, С. В. Рациональные параметры ножовых бестраншейных укладчиков / С. В. Кравец, О. Л. Романовський, О. Ю. Васильчук // Механізація та електрифікація сільського господарства. – Глеваха. – 2014. – Вип. 99. Том 1. – С. 194 – 203.

74. Красников, Н. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения / Н. Д. Красников. – Л.: Стройиздат, 1970. – 240 с.
75. Кулен, А. Современная земледельческая механика / А. Кулен, Х. Куиперс. – М.: Агропромиздат, 1986. – 349 с.
76. Кульчицкий, В. А. Двухмерная эволюционная математическая модель тепловлагопереноса в грунтовом основании / В. А. Кульчицкий, В. А. Макагонов // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – № 8. – 2004. – С. 150-155.
77. Кушнарев, А. С. Механико-технологические основы процесса воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий на почву: дис. докт. техн. наук: 05.20.01 / А. С. Кушнарев. – Мелитополь, 1980. – 329 с.
78. Лабода, В. Г. Подпочвенное орошение в условиях Крыма / В. Г. Лабода // Вопросы орошения. – Киев: Урожай, 1964. – С. 55-63.
79. Лабода, В. Г. Подпочвенное орошение виноградников на крутых склонах / В. Г. Лабода, Н. И. Подлесная // Гидротехника и мелиорация. – 1968. – № 11. – С. 57-64.
80. Лебедев, А. Ф. Почвенные и грунтовые воды / А. Ф. Лебедев. – М. - Л.: Изд. АН СССР, 1955. – С. 25-85.
81. Лебедев, Г. В. Импульсное дождевание и водный обмен растений / Г. В. Лебедев. – М., 1969. – 109 с.
82. Лурье, А. И. Пространственные задачи теории упругости / А. И. Лурье. – М.: Гостехиздат, 1955. – 492 с.
83. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно - пористых телах / А. В. Лыков. – М.: Гос. изд. техн. - теор. лит., 1954. – С. 31-130.
84. Мазепа, М. В. Распределение поливной воды в почвенном профиле при внутрипочвенном орошении на крутых склонах / М. В. Мазепа, Е. П. Боровой // Сб. научн. тр. Волгоградского СХИ. – Волгоград, 1991. – С. 28-32.

85. Марков, Ю. А. Проблемы оптимизации орошения садов / Ю. А. Марков // Садоводство. – №6. – 1985. – С. 27-28.
86. Мацепуро, В. М. Рациональная формула В. П. Горячкина и характер зависимости ее коэффициентов от основных факторов, влияющих на сопротивление почв / В. М. Мацепуро // Труды ВИМ. – М. – 1975. – т. 69. – С. 11-58.
87. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: Справочник / Б. Б. Шумаков, под ред. – М.: Агропромиздат, 1990. – 415 с.
88. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
89. Мер, И. И. Мелиоративные машины / И. И. Мер. – М. : Колос, 1980. – 351 с.
90. Мертин, В. Результаты подпочвенного орошения по методу Нидервермера / В. Мертин // Труды IX Международного конгресса по ирригации и дренажу, вопрос 32. – М.: ВНИИТЕИСХ. – 1975. – С. 89-99.
91. Mehdi, El-Sahaf. Современное состояние ирригации в бассейне Евфрата (Ирак) / El-Sahaf Mehdi, I. S. Zonn // Гидротехника и мелиорация. – 1967. – №2. – С. 17-24.
92. Муромцев, Н. А. Использование тензиометров в гидрофизике почв / Н. А. Муромцев. – Д.: Гидрометеиздат, 1979. – С. 19-10.
93. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Мир, 1968. – 863 с.
94. Нерпин, С. В. Физика почвы / С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский. – М.: Наука, 1967. – С. 9-348.
95. Нечидюк, А. А. Розробка і дослідження двох`ярусного безтраншейного укладача підземних комунікацій : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.05.04 / А. А. Нечидюк. – Дніпропетровськ. – 2002. – 20 с.
96. Новожилов, В. В. Вопросы механики сплошной среды / В. В. Новожилов. – Л.: Судостроение, 1989. – 400 с.

97. Новые способы орошения садов и виноградников / В. И. Водяницкий, П. В. Ключко, А. Д. Лянной и др.; Под ред. В. И. Водяницкого. – К.: Урожай, 1987. – 216 с.

98. Новые технологии проектирования, обоснования строительства, эксплуатации и управления мелиоративными системами: монография / Л. В. Кирейчева, Н. П. Карпенко, О. Б. Хохлов, Ю. А. Гольцов. – М.:ГНУ ВНИИГиМ, 2010. – С. 114-122.

99. Остапчик, В. П. Опытное обоснование техники трубчатого подпочвенного орошения: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 06.01.02. / В. П. Остапчик. – М., 1962. – С. 5-19.

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

101. Партон, В. З. Механика упругопластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – М.: Наука, 1985. – 504 с.

102. Патент 2032031 RU, МКИЗ E02F 5/10 Землеройный рабочий орган для бестраншейной укладки труб / С. В. Кравец, А. А. Нечидюк, В. Ф. Ткачук (Украина), А. Е. Калмыков (Россия), С. В. Ковалёв (Украина). – №4902864/03; заявл. 26.11.90; опубл. 27.03.95, Бюл. – №9.

103. Патент на полезную модель 38342 RU, МКИЗ E02F 5/10 Землеройный рабочий орган для бестраншейного укладчика труб / Н. А. Ермошин, С. Б. Норышев – № 2004106468/20; заявл. 27.02.2004; опубл. 10.06.2004.

104. Патент 101524 UA МПК A01V 13/00 Землеройный рабочий орган / С. В. Кравец, О. Л. Романовський, О. Ю. Васильчук; заявник і власник патенту НУВГП – № а201105496; заявл. 29.04.2011; опубл. 10.04.2013; Бюл. № 7.

105. Патент на корисну модель 84266 UA, МПК E02F 5/10 Робочий орган трубоукладача / С. В. Кравец, О. Ю. Васильчук О. Л. Романовський, та ін.; заявник і власник патенту НУВГП – № u201306196; заявл. 20.05.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19.

106. Петров, Г. А. Гидравлика переменной массы (движение жидкости с изменением расхода вдоль пути) / Г. А. Петров. – Харьков: ХГУ, 1964. – С. 3-59.
107. Полянин, А. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики / А. Д. Полянин. – М., Физматлит. – 2001. – 576 с.
108. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения / В. Л. Попов. – М. ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.
109. Почвоведение. Учеб. Для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В. А. Ковды, Б. Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г. Д. Белицина, В. Д. Васильевская, Л. А. Гришина и др. – М.: Высш. шк. – 1988. – С. 235-246.
110. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
111. Проспект компании «РосПайп». – Режим доступа: <http://ros-pipe.ru/clauses/stroitelstvo-remont-truboprovodov/klassifikatsiya-bestransheynykh-metodov-prokladki/>
112. Проспект фирмы «GOUCH ENGINEERING». – Режим доступа: <http://fieldchief.co.nz>
113. Проспект фирмы «Михневский ремонтно – механический завод». – Режим доступа: <http://www.cdminfo.ru>
114. Райхман, Д. Б. Анализ способов орошения в сельском хозяйстве / Д. Б. Райхман, Д. В. Зубоченко // Научные Труды ЮФ НУБиП Украины «Крымский агротехнологический университет», серия «Технические науки», 2013. – №153. – С. 194-203.
115. Ребиндер, П. О. Избранные труды. Физико-химическая механика / П. О. Ребиндер. – М. Наука, 1979. – 342 с.
116. Рекс, Л. М. Методика расчета тепловлагосолепереноса в насыщенных и ненасыщенных грунтах с помощью ЭВМ. Моделирование гидрогеохимических процессов и научные основы гидрогеохимических прогнозов. – М.: Наука, 1985. – 152 с.

117. Ридигер, В. Р. Подпочвенное орошение по кротовым дренам / В. Р. Ридигер. – М.: Колос, 1965. – 69 с.
118. Роде, А. А. Методы изучения водного режима почв / А. А. Роде. – М.: Изд. АН СССР, 1960. – 244 с.
119. Роде, А. А. Основы учения о почвенной влаге. Водные свойства почв и передвижение почвенной влаги / А. А. Роде. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – Т. 1. – С. 362-621, 663.
120. Романовский, А. Л. К вопросу скольжения частицы грунта по клину в фазе уплотнения / А. Л. Романовский // Тез. докл. науч. – техн. конф. Достижения научно – технического прогресса – в практику мелиоративного строительства. – Ровно, 1990. – С. 21.
121. Романовський, О. Л. До питання про тиск ґрунту на лемеші багатоярусного землерийного робочого органа агро меліоративного агрегату / О. Л. Романовський // Тез. наук. конф. УПВГ. – 70 років, 1992. – С.32.
122. Романовський, О. Л. Дослідження технологічного процесу роботи та обґрунтування параметрів багатоярусного робочого органа безтраншейного дренаукладача : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / О. Л. Романовський. – Луцьк, 1996. –16 с.
123. Ромащенко, М. І. Системи краплинного зрошення: навчальний посібник / М. І. Ромащенко, В. І. Доценко, Д. М. Онопрієнко, О. І. Шевелєв. – Дніпропетровськ, 2007. – 175 с.
124. Ромащенко, М. І. Краплинне зрошення овочевих культур і картоплі в умовах Степу України / М. І. Ромащенко, А. П. Шатковський, С. В. Рябков. – К.: «ДІА», 2012. – 248 с.
125. Садык Обейд Хасун. Влияние предшественников и азотных удобрений на свойства аллювиальных почв и продуктивность яровой пшеницы при орошении в условиях Центрального Ирака: автореф. дисс.... канд. с.-х. н.: 06.01.01 / Обейд Хасун Садык. – Москва, 2011. – 14 с.
126. Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации / Е. С. Марков, ред. – М., 1981. – 89 с.

127. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Е. Листопад, под ред. – М.: Агропромиздат, 1986. – 688 с.
128. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, Н. М. Панов. – М.: Машиностроение, 1979. – 328 с.
129. Смирнов, В. Н. Повышение эффективности рабочих органов землеройных машин / В. Н. Смирнов. – К.: Полиэкс, 1993. – 144 с.
130. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М.: Изд-во физ.- мат. литературы, 1960. – 240 с.
131. Сорочкин, В. М. Изменение структуры почвы при уплотнении / В. М. Сорочкин, В. Н. Шептухов // Труды Горьковского СХИ – 1978. – Т. 24. – С. 49-54.
132. Справочник по орошаемому садоводству / В. И. Сенин, В. И. Водяницкий, Н. А. Барабаш и др.; Под. ред. В. И. Сенина. – К.: Урожай, 1992. – 192 с.
133. Судницын, И. И. Закономерности передвижения почвенной влаги / И. И. Судницын. – М.: Наука, 1964. – С. 64-116.
134. Сукач, М. К. Модель пластической деформации грунта при щелевом резании / М. К. Сукач, Ю. П. Филонов, Р. Ю. Новиков // Гірничі будівельні, дорожні і меліоративні машини. Всеукр. наук. зб. пр. – К.: Техніка, 2011. – № 77. С. 3 – 11.
135. Супонев, В. Н. Определение параметров рабочего оборудования трубозаглубителей / В. Н. Супонев // Энергосбережение. Энергоаудит. Общегосударственный научно-производительный информационный журнал. – Харьков: СВЭКО, 2006. – Вып. – 10. – С. 23 – 30.
136. Томин, Е. Д. Бестраншейные дренажники в СССР и за рубежом / Е. Д. Томин, А. Н. Ефремов, Б. И. Люлькин, В. Н. Буравцев. Обзорная информация. - М.: ЦБНТИ Минводхоз СССР, 1983. – №13. – С. 84.
137. Хайдер Раад Надим Аль-Хазаали. О взаимодействии рабочего органа с почвой для образования кротовины / Хайдер Раад Надим Аль-

Хазаали, В. П. Ковбаса // Науковий вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.8. – С. 347-355.

138. Хайдер Раад Надим Аль-Хазаали. О динамических характеристиках и уплотнении почвы под воздействием кротователя / Хайдер Раад Надим Аль-Хазаали, В. П. Ковбаса // Науковий вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2017. – Вип. 27.1. – С. 206-211.

139. Хайзерук, Е. М. Машины и механизмы для прокладки кабеля. – М.: Машиностроение, 1991. – 352 с.

140. Хайлис, Г. А. О смещении дренажа при движении в неоднородном грунте / Г. А. Хайлис, Д. А. Вехалевский, В. В. Кованько // Конструирование и технология производства сельскохозяйственных машин. Респ. межвед. науч. – техн. сб. – К.: Техника, 1988. – Вып. 18. – С. 71 – 76.

141. Хархута, Н. Я. Реологические свойства грунтов / Н. Я. Хархута, В. М. Ивлев. – М.: НТИ Минавтотранса и шос. дорог РСФСР, 1961. – 64 с.

142. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

143. Черкасов, А. А. Мелиорация и сельскохозяйственное водоснабжение / А. А. Черкасов. – М., 1958. – 164 с.

144. Чернов, Г. И. Разработать режимы и технологию поверхностного орошения садов. – Алма-Ата: Отчет КазНИИПиВ. – 1981. – 170 с.

145. Шейнкин, Г. Ю. Техника и организация орошения в Таджикистане / Г. Ю. Шейнкин. – Душанбе: "ИРФОН", 1970. – 446 с.

146. Шелудченко, Б. А. Обоснование рабочего процесса и параметров глубокорыхлящих рабочих органов объемного типа: дисс.... к. т. н.: 05.20.01. / Б. А. Шелудченко. – Глеваха, 1990. – 207 с.

147. Шелудченко, Б. А. Агротехніка ґрунтів / Б. А. Шелудченко. – Житомир: Полісся, 1993. – 290 с.

148. Шукле, Л. Реологические проблемы механики грунтов / Л. Шукле. – М.: Стройиздат, 1976. – 486 с.

149. Шумаков, Б. Б. Методика расчета элементов техники и режима внутрипочвенного орошения / Б. Б. Шумаков, А. А. Алексашенко, Д. П. Гостищев // Гидротехника и мелиорация. – 1985 – № 8. – С. 41-43.
150. Buckingham, E. Studies on the movement of soil moisture / E. Buckingham // VS. Dep. Agr. Bur. of soil. – Bull. 38. – W., 1907. P. 44-51.
151. Boels, D. Effect of soil deformation in trenchless drain laying ./ D. Boels. Research digest. ICW, Technical Bulletin 117, Institute for Land and Water Management, Wageningen. The Netherlands, 1980. – P. 154 – 159.
152. Edlefsen, N. and Andersen A. Thermodynamics of soil moisture / N. Edlefsen, A. Andersen // Hilgardia. – V. 15, 1943. – P. 74-81.
153. Listopad, G. E. Technology Guide programmed cultivation of grain and forage crops on irrigated lands of the Lower Volga / G. E. Listopad, A. F. Ivanov, A. A. Klimov, V. I. Filin. – Volgograd Agricultural Institute, 1979. – P. 15-17.
154. Field testing of a Soil compaction model / S. C. Gupta, A. Hadas, D. Wolf, W. E. Larson, E. S. Schneder // International conference on Soil Dynamics, Proceeding. – Auburn, Alabama, 1985. – V. 5. – P. 979–994.
155. Koefed, S. S. Kinematics and Power Requirement of Oscillation Tillage Tools / S. S. Koefed // Journ. Agriculture Engineering Research. – 1969. – 14 (1). – P. 54–73.
156. Philip, J. The physical principles of Soil water movement during the irrigation cycle / J. Philip // Aoc. 3rd Intern. Congr. Irrig. Drainage. – 8, 1957. – P. 125-154.
157. Roce, C. Agricultural Physics / C. Roce. – Oxford. Pergamen Press Ltd., 1966. – 124 p.
158. Richards, L. E. Capillary condition of liquids through porous medium / L. E. Richards. – Physics, 1931. – V. 1. – №5. – P. 318-322.