

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Н. Ельцина

Диссертационный совет Д 05.23.664

На правах рукописи
УДК: 699.879.322

Тургунбаев Мелисбек Сыргабаевич

**Научные основы теории резания грунтов с каменистыми включениями
рабочими органами землеройных машин**

05.05.04 – дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Бишкек – 2024

Диссертационная работа выполнена на кафедре механики и промышленной инженерии Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

Научный консультант: **Тургумбаев Женишбек Жумадылович**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры механики и промышленной инженерии
Кыргызского государственного технического университета
им. И. Раззакова

Официальные оппоненты: **Мырзашев Сагатбек**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры нефти, газа и горного дела Таразского
регионального университета имени М. Х. Дулати
Мауленов Жумадил Карбышевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры транспортной техники и организации
перевозок Казахского автомобильно-дорожного института
им. Л. Б. Гончарова Республики Казахстан
Диметов Хаким Нишанбаевич
доктор технических наук, профессор,
менеджер по корпоративным отношениям компании SADE
CGTH JSI Республики Узбекистан

Ведущая организация: **Институт машиноведения, автоматики и геомеханики
Национальной академии наук Кыргызской Республики**
Адрес: 720055, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул.
Скрябина, 23.

Защита диссертации состоится «7» марта 2025 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 05.23.664 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) технических наук при Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова и Кыргызско-Российском Славянском университете им. Б. Н. Ельцина по адресу: 720020, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Малдыбаева 34, б, Большой актов зал, www.kstu.kg, тел: 0(312) 543561, факс: 0(312) 545162. Ссылка для доступа к видеоконференции защиты диссертации: <https://vc.vak.kg/b/052-cxc-nsq-nbk>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова по адресу: 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66 и Кыргызско-Российского Славянского университета им. Б. Н. Ельцина по адресу: 720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44 и на сайте Национальной аттестационной комиссии при Президенте Кыргызской Республики: https://vak.kg/diss_sovety/d-05-23-664.

Автореферат разослан «5» февраля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., профессор



Маданбеков Н. Ж.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В Кыргызской Республике (КР) строительство является одной из интенсивно развивающихся, ведущих отраслей экономики. При строительстве различных зданий, сооружений, в горной промышленности выполняется большой объем земляных работ землеройными машинами (ЗМ) по переработке как однородных грунтов, так и связных дисперсных грунтов с каменистыми включениями (грунты с КВ).

Удельный вес грунтов, содержащих КВ по данным наших исследований составляет более 20 % по территории КР, разработка которых связано с повышением удельных силовых и энергетических затрат, появляются случайные, динамические нагрузки для металлоконструкции рабочего оборудования, рабочего органа ЗМ, вызывающие их преждевременные усталостные повреждения.

По определению силы сопротивления однородного грунта, и грунта с КВ резанию занимались ученые Ю. А. Ветров (1951-1971 гг.), А. Н. Зеленин (1959-1975 гг.), Н. Г. Домбровский (1961-1985 гг.), В. И. Баловнев (1963-1981 гг.), А. R. Reese (1964-1985 гг.), К. А. Артемьев (1978-1989 гг.), Э. А. Кравцов (1985-1990 гг.) и другие. Существующие теории, разработанные на основе теории механики грунтов и предельного напряженного состояния (ПНС) сыпучей среды не рассматривают вопросы разрушения грунтов, содержащих различные КВ рабочим органом ЗМ.

В связи с этим исследование процесса резания грунтов, с целью установления основных закономерностей разрушения грунтов, содержащих КВ рабочими органами ЗМ приобретает обоснованную **актуальность темы настоящей диссертационной работы.**

Связь темы диссертации с крупными научными программами (проектами) и основными научно-исследовательскими работами: Государственные бюджетные научно-исследовательские работы «Исследование грунтовых условий эксплуатации землеройных машин в Таласском регионе КР» (регистрационный № 0005335) и «Разработка рабочих органов землеройных машин для освоения подземного пространства в стесненных городских условиях способом «стена в грунте»» (регистрационный № 0007833).

Целью диссертационной работы является разработка научных основ теории резания грунтов с КВ рабочими органами ЗМ, путем проведения теоретических и экспериментальных исследований, установления закономерностей процесса разрушения грунтов с КВ.

Для достижения цели необходимо решить **следующие задачи:**

- анализ основных положений существующих теорий процесса резания грунтов ЗМ;
- установление стохастической модели грунтов, содержащих КВ;
- математическое моделирование силы сопротивления резанию, энергии, прорези повреждения и локальной энергоемкости разрушения грунтов с КВ рабочим органом ЗМ;

- разработка математических регрессионных моделей локальной энергоемкости разрушения грунтов, содержащих различные КВ рабочими органами ЗМ;
- разработка стенда для физического моделирования резания грунтов, анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, оценка достоверности теоретических положений;
- разработка методик расчета усталостной долговечности металлоконструкции и производительности ЗМ, выработка рекомендаций, направленных на повышение эффективности ЗМ.

Научная новизна полученных результатов заключается:

- определены вероятности появления, вероятностный диапазон изменения физико-механических свойств грунтов с КВ и классификация КВ, позволяющие формировать стохастическую модель нагрузки ЗМ;
- разработаны критерии подобия, позволяющие формировать структуру, гранулометрический состав, физико-механические свойства модельного грунта в соответствии с установленным законом распределения (ЗР) минералов и минеральных частиц грунта;
- разработаны математические модели, позволяющие определить силу сопротивления однородного (заполнителя) грунта, грунта, содержащего шаровидное/эллипсоидное КВ в зависимости от параметров грунта, его резания и КВ;
- созданы математические модели локальной энергии, энергоемкости и прорези разрушения грунтов с КВ на основе впервые используемого параметра «длины резания» грунта;
- составлены математические регрессионные модели, позволяющие рассчитать локальную энергоемкость разрушения грунтов с КВ, в соответствии с параметрами грунта, его резания и КВ;
- установлены виды разрушения грунтов с учетом глубины залегания КВ относительно режущей кромки, позволяющие систематизировать множества разрушения грунтов рабочим органом ЗМ;
- определены геометрические параметры, позволяющие рассчитать объемы прорези разрушения грунта с КВ рабочим органом ЗМ.

Практическая значимость полученных результатов. Стенд обеспечивает физическое моделирование процесса резания грунта с КВ режущим инструментом рабочего органа, ковш со специальными зубьями повышает техническую производительность экскаватора на 8...12 %, а ковш с упругими зубьями увеличивает усталостную долговечность металлоконструкции рабочего органа экскаватора на 5...15 %. Ковши экскаватора внедрены в Таласский филиал государственного предприятия «Автожол», в ДЭП № 47 при Министерстве транспорта и коммуникаций КР, в муниципальное предприятие по оказанию коммунальных услуг г. Талас и в учебный процесс КГТУ им. И. Раззакова.

Экономическая значимость полученных результатов. Конструкции зубьев ковша экскаватора снижают продолжительность копания грунтов с КВ на 15...20 %, повышают техническую производительность экскаватора на 8...12 %, и усталостную долговечность локальных участков металлоконструкции ковша экскаватора на 5...15 %.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- удельный вес грунтов с КВ в грунтовом фоне КР, классификация КВ грунтов;
- моделирование структуры, физико-механических свойств грунтов в соответствии с установленными ЗР и критериями подобия;
- математические модели силы сопротивления резанию, локальной энергии, энергоемкости и прорези разрушения однородного грунта и грунта с различными КВ;
- математические регрессионные модели локальной энергоемкости разрушения грунтов, содержащих различные КВ рабочим органом ЗМ;
- разновидности разрушения грунтов в зависимости от глубины залегания КВ относительно режущей кромки рабочего органа ЗМ;
- методика расчета усталостной долговечности локальных участков металлоконструкции рабочего органа ЗМ и технической производительности одноковшовых экскаваторов, разрабатывающих грунты с КВ.

Личный вклад соискателя. Теоретические исследования выполнены автором совместно с научным консультантом. Стенд для физического моделирования, конструкции зубьев ковша разработаны, экспериментальные исследования по резанию грунтов с КВ в лабораторных и полевых условиях проведены лично автором.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и отдельные разделы работы докладывались на: МНПК «Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства» (Красноярск, 2016 г.); МНПК «Научное обеспечение как фактор устойчивого развития водного хозяйства» (Тараз, 2016 г.); МНПК «Высокие технологии. Экология» (Воронеж, 2020 г.); МНПК «Строительная наука и образование: интеграция вузовской науки в устойчивое инновационное развитие страны» (Бишкек, 2022 г.).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По теме диссертационной работы опубликованы 34 научных статьи, в том числе 2 статьи в журналах, входящих в БД «Scopus», получены 8 патентов КР на изобретение и полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложений, содержит 243 страниц машинописного текста, 85 рисунков, 33 таблицы. Список использованной литературы состоит из 228 наименований.

Автор выражает большую благодарность д.т.н., профессору Р. А. Мендекееву за ценные консультации, а также сотрудникам Таласского государственного университета и вышеуказанных предприятий, оказавших помощь при проведении исследований и подготовке данной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы, направление исследований и общая характеристика диссертационной работы. Обозначены цели, задачи исследования, научная новизна и оценка практической значимости полученных результатов.

В первой главе «Проблемы повышения эффективности землеройных машин, предназначенных для разработки грунтов, содержащих каменные включения» проведен обзор и анализ текущего состояния исследуемой проблемы. При проведении строительных работ, в горной промышленности выполняется большой объем земляных работ, которые непосредственно связаны с разработкой как однородных грунтов, так и грунтов с КВ ЗМ. Анализ результатов обследований металлоконструкции в производственных условиях показывает, что основная доля поломок МК рабочего оборудования, рабочего органа ЗМ вызвана недостаточной усталостной прочностью. При разработке грунта с КВ, металлоконструкции рабочего оборудования, рабочего органа ЗМ испытывают случайные, динамические процессы нагружения. Структура этих случайных процессов зависит от физико-механических свойств и гранулометрического состава грунтов. Наличие в грунтах крупных горных обломков, в виде КВ, наличие концентраторов напряжений, перегрузки конструкций из-за неправильной эксплуатации и затупленность режущих инструментов оказывают непосредственное влияние на появление случайных, быстро изменяющихся во времени режимов нагрузки.

Важным и необходимым условием формирования оптимального состава парка ЗМ является наличие полной информации о грунтовых условиях эксплуатации, в том числе о стохастических характеристиках грунтов, содержащих каменные включения. Грунтовые данные также необходимы при автоматизации землеройных процессов.

Системный анализ взаимодействия рабочего органа ЗМ с разрабатываемой средой показывает, что выходными параметрами этой системы являются, удельные силовые и энергетические затраты разрушения грунта, и исследование влияние на них КВ грунта является актуальной задачей.

Проведен обзор и анализ ранее известных двух и трехмерных моделей прогнозирования силы сопротивления грунта резанию рабочим органом ЗМ, основанных на различных теориях. Известные теории, описывающие процесс взаимодействия разрабатываемой среды с рабочим органом ЗМ можно разделить на 3 группы: теории, основанные преимущественно на результатах экспериментальных исследований, которые фиксируют лишь частные сочетания факторов, теории, основанные на положениях теории ПНС сыпучей среды, которые отличаются математической строгостью, позволяют учитывать влияние основных физико-механических свойств грунта и параметров резания на силу сопротивления грунта резанию, и теории резания грунтов ЗМ, основанные на фундаментальном уравнении землеройных работ (FEE), используемые в основном зарубежными исследователями.

Модели Н. Г. Домбровского, А. Н. Зеленина, Ю. А. Ветрова и др., относятся к моделям, основанных на теориях, основанных на результатах экспериментальных исследований, модели Ю. А. Ветрова, В. И. Баловнева, К. А. Артемьева основаны на теории ПНС сыпучей среды, а модели А. R. Reese, M.S. Osman, E. McKyes, J. O'Callaghan и K. Farrelly, R. Godwin и G. Spoor, Perumpral - Grisso - Desai разработаны на базе FEE.

Физико-механические свойства и гранулометрический состав грунтов подчиняются стохастическим закономерностям, они изменяются от одной точки к другой. В связи с этими, установление удельных силовых и энергетических затрат разрушения всего многообразия грунтов, в том числе грунтов содержащих КВ экспериментальными исследованиями становится невозможным.

Известны работы, посвященные грунтовому, почвенному фону: А. М. Мамытов составил карта земельного кадастра КР, Р. А. Кабашевым установлен грунтовой фон Казахстана, С. Мырзашевым, Н. Т. Сурашовым созданы рабочие органы ЗМ и землеройно-транспортных машин, адаптирующихся к грунтовым условиям, тем самым повышающие эффективность разработки грунтов, О. Ж. Рабат исследовал влияние износа режущего инструмента на систему «грунт – жидкость», Ж. К. Мауленовым установлены оптимальные формы и параметры ковшей скреперов. Прогнозирование силы сопротивления разрушению грунта с КВ рассмотрены в работах Э. А. Кравцова, Z. Korzen.

Существующие теории, разработанные на основе теории механики сплошной среды, теории пластичности и ПНС сыпучей среды рассматривают резание однородного грунта с учетом удельной силовой затраты и не рассматривают вопросы резания грунтов, содержащих различные КВ рабочим органом ЗМ. В связи с этими положениями, исследование процесса резания грунтов, с целью установления основных закономерностей разрушения грунтов, содержащих КВ рабочими органами ЗМ приобретает обоснованную **актуальность темы настоящей диссертационной работы.**

Настоящая диссертационная работа посвящена к разработке математических моделей сил сопротивления резанию, энергии, объемов прорези и локальной энергоемкости разрушения грунтов, содержащих различные КВ рабочими органами ЗМ.

Для разработки корректной аналитической модели и уточнения ее структуры, состава применяются физико-математическое, физическое моделирования процессов взаимодействия рабочего органа с разрабатываемой средой. Вопросы моделирования взаимодействия рабочего органа ЗМ с грунтом нашли отражение в работах В. И. Баловнева, Ж. Ж. Тургумбаева, С. Мырзашева и других.

В общем случае, сопротивление грунта внешнему механическому воздействию обусловлено действием сил сопротивления, действующих на систему (1):

$$P_r = P_1 + P_2 + P_3 + P_4, \quad (1)$$

где P_1 – сопротивление, обусловленное объемным весом грунта; P_2 – сопротивление, обусловленное силами сцепления, сдвига, смятия и отрыва и др.;

P_3 – сопротивление, обусловленное силами, пропорциональных размеру РИ; P_4 – сопротивление, обусловленное силами пропорциональных размеру КВ.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований будет уточняться структура, вид зависимостей силы сопротивления грунта с КВ резанию (1), и локальная энергоёмкость разрушения грунта с КВ рабочим органом ЗМ.

Во второй главе «Стохастическая модель грунтов, содержащих каменные включения» определены вероятности появления грунтов с КВ, их вероятностный диапазон изменения физико-механических свойств с использованием свыше 1000 паспортов грунтов на основе данных изысканий «Кыргызгипроводхоза», «Кыргыздортранспроекта» и управления геологии КР. Стохастические параметры грунтов рассчитаны в современной программной системе «Statistica».

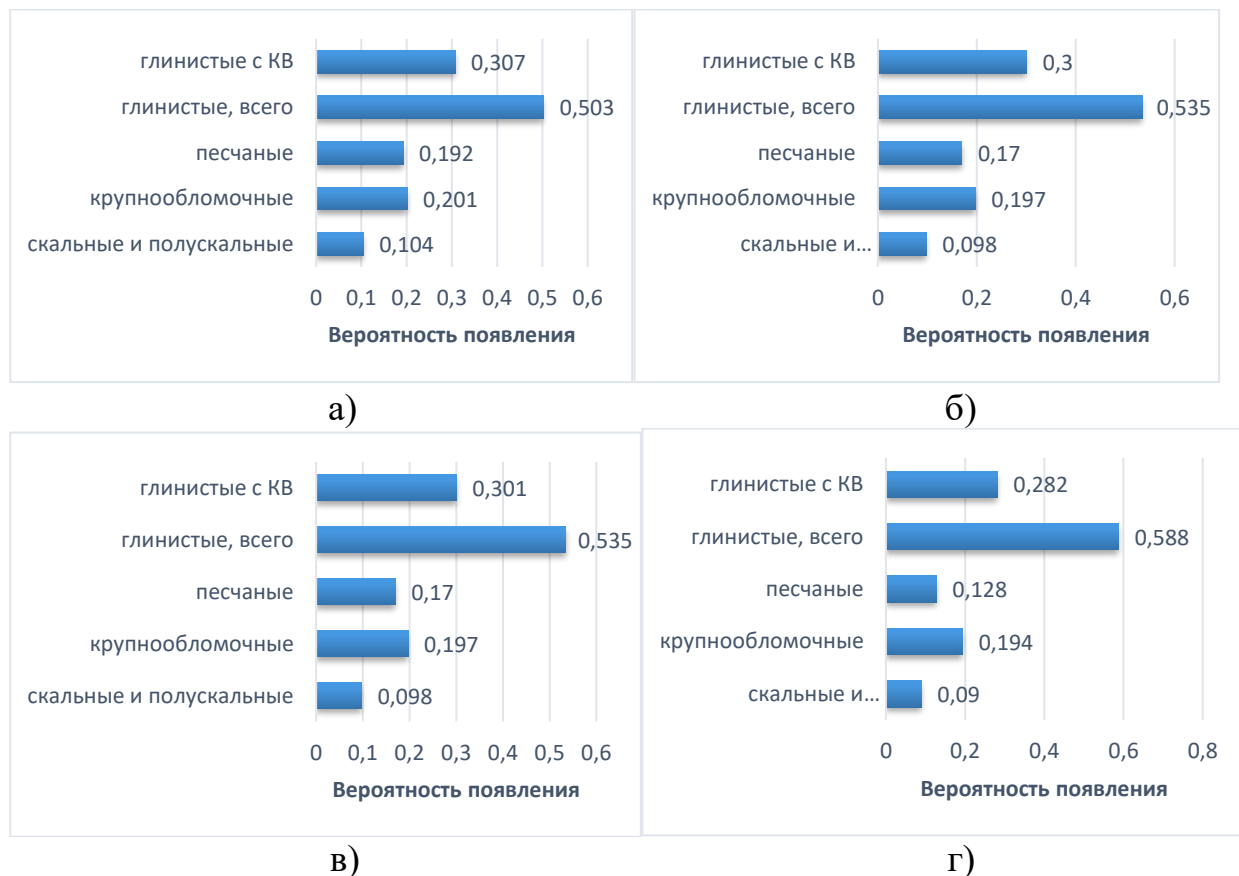


Рисунок 1 – Гистограмма распределения различных видов грунтов в 6 м поверхностной толщ пород по территории КР: а) – I строительно-климатический район; б) – II строительно-климатический район; в) – III строительно-климатический район; г) – IV строительно-климатический район

Грунт, содержащий КВ – это осадочный связный дисперсный грунт, структура которого представляет собой механическую смесь мелкозернистых (мельче 2 мм) и крупнозернистых (крупнее 2 мм) минералов и минеральных

частиц, между которыми существуют физические, физико-химические и механические связи, состоит из каркаса, создаваемого КВ, заполнителя, влаги и воздуха, заземленного в пустотах (порах) структуры (рисунок 1).

На основе принятых допущений установлен ЗР вероятностей минералов и минеральных частиц грунтов КВ, подчиняющийся ЗР Пуассона (2):

$$P(f) = \frac{m^f}{f!} e^{-m} \quad (f = 0, 1, 2 \dots n) \quad (2)$$

где m - математическое ожидание, f - минеральная частица i -того размера.

С увеличением содержания частиц крупнее 2 мм снижается содержание пылевато-глинистых частиц с возрастанием вероятности появления гравийных, галечниковых и валунных частиц, а количество песчаных частиц сначала возрастает, далее снижается.

На основе статистической обработки свойств грунтов, приведенных в их паспортах определены вероятностные диапазоны изменения физическо-механических свойств грунтов, содержащих КВ.

С учетом признаков: механическая прочность (очень прочные, прочные, средней прочности, мало прочные и пониженной прочности); размер (мелкообломочные, крупнообломочные); форма (шаровидное, эллипсоидное, яйцеобразное, плоское, неправильной формы); степень окатанности (округлообломочные, угловатообломочные); шероховатость поверхности (гладкие, шероховатые) составлена классификация, позволяющая систематизировать КВ грунта. Для практических расчетов силы сопротивления грунта резанию предлагаются формы КВ, полученные на основе коэффициента сжатия шаровидной геометрической формы (3,4,5):

$$k_x = \frac{a_e - a_e}{a_e}, \quad (3)$$

$$k_y = \frac{a_e - b_e}{a_e}, \quad (4)$$

$$k_z = \frac{a_e - c_e}{a_e}, \quad (5)$$

где a_e – большая полуось эллипсоида, b_e , c_e – маленькие полуоси эллипсоида.

Установленный ЗР минералов и минеральных частиц грунтов с КВ, позволяет моделировать структуру и физико-механические свойства грунтов для проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Модельные грунты в зависимости от числа пластичности I_p подразделяются на виды (супесь, суглинок, глина), содержание минеральных частиц крупнее 2 мм составляет 30 %, 73 %, консистенция заполнителя изменяется $I_L = 0 \dots 0,25$ (полутвердое); $I_L = 0,5 \dots 0,75$ (мягко и текуче пластичное), а форма КВ изменяется от близко шаровидной до близко эллипсоидносуженной.

Для обеспечения подобности процессов резания грунта в производственных и лабораторных условиях разработаны соответствующие критерии подобия.

Сила сопротивления резанию грунта с КВ представляется функцией, зависящей от факторов (6):

$$P_{md} = f(C, v_c, a_e, b, I_p, I_L, \varphi, \varphi_0, d_1, d_2), \quad (6)$$

где C – удельное сцепление грунта, v_c – скорость резания, a_e – размер КВ, b – ширина резания, I_p – числа пластичности, I_L – консистенция, φ – угол внутреннего трения, φ_0 – угол внешнего трения, d_1 – содержание минеральных частиц менее 2 мм, %; d_2 – содержание минеральных частиц крупнее 2 мм, %.

Параметры I_p , I_L , φ , φ_0 , d_1 , d_2 выступают в качестве отдельного критерия подобия, как безразмерные величины. Опытная скорость резания соответствует диапазону скорости резания грунта с КВ в производственных условиях.

На основе анализа размерностей установлен общий вид зависимости между влияющими факторами и силой сопротивления грунта резанию (7):

$$P_{md} = C a_e^{2-d} b^d, \quad (7)$$

где C – удельное сцепление грунта, a_e – размер КВ, b – ширина резания.

Для уточнения указанной зависимости требуются проведения теоретических и экспериментальных исследований по резанию грунта, содержащего КВ режущим инструментом рабочего органа ЗМ. У грунтов преобладающими, основными характеристиками выступают объемный вес и силы тяжести грунта. Критерий подобия прочности установлен на основе соотношения удельного сцепления грунта - C к его удельному весу - γ (8):

$$\Pi_2 = \frac{C}{\gamma l}, \quad (8)$$

где l – характерный масштаб.

Подобие физико-механических свойств заполнителя и режима резания обеспечивается 6-ю критериями подобия, а содержание минералов и минеральных частиц грунта - 9-ю критериями подобия. Нормативные угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта определены по известным зависимостям.

Третья глава «Теоретические исследования процесса резания грунтов с каменистыми включениями рабочими органами землеройных машин» посвящена разработке основы теории резания грунтов с КВ рабочим органом ЗМ.

Установлены закономерности расположения центра тяжести КВ относительно симметрии прорези разрушения (рисунок 2), обоснована

применимость предельных нагрузок пассивного давления грунта, определенного теорией ПНС сыпучей среды к теории резания грунта, содержащего КВ рабочим органом ЗМ.

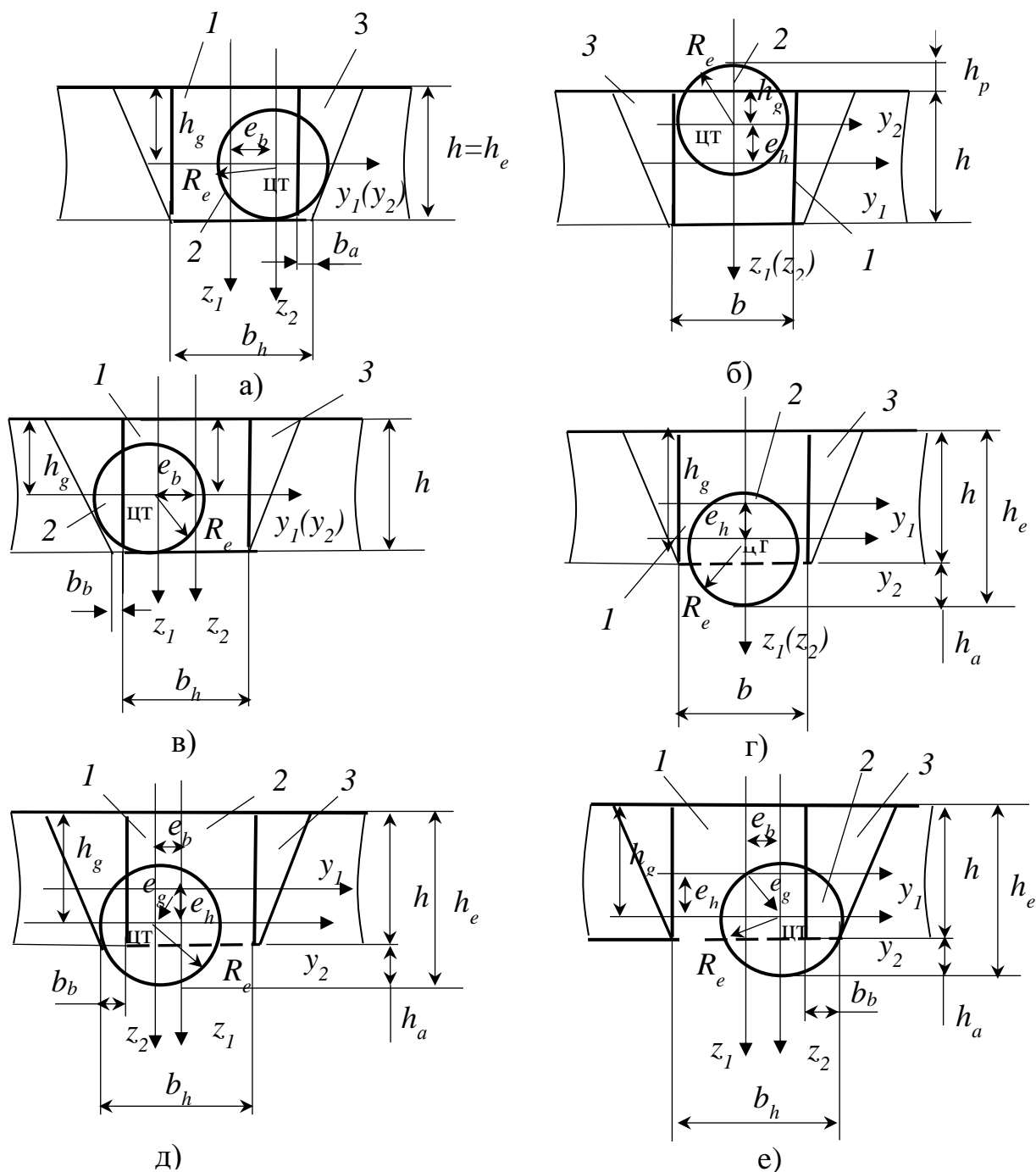


Рисунок 2 – Эксцентричное расположение центра тяжести шаровидного КВ: 1- режущий инструмент, 2 – КВ, 3 – прорезь разрушения, R_e – радиус КВ, h – глубина резания, h_e – глубина залегания КВ, h_p – пассивная высота КВ, h_a – дополнительная глубина залегания КВ, h_g – координаты центра тяжести КВ, b – ширина резания, b_h – ширина резания каменной зоны, b_a – влияние КВ на ширину резания, e_b – эксцентриситет ширины резания, e_h – эксцентриситет глубины резания, а) $e_b > 0$, $e_h = 0$; б) $e_b = 0$, $e_h < 0$; в) $e_b < 0$, $e_h = 0$; г) $e_b = 0$, $e_h > 0$; д) $e_b < 0$, $e_h > 0$; е) $e_b > 0$, $e_h > 0$

В общем случае, разрушение грунта под воздействием геометрически подобных подпорной стены, режущего инструмента и элементарной подпорной стены на поверхности КВ имеет одинаковую физическую природу, описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями равновесия, условиями неразрывности, уравнениями состояния, грунт разрушается по достижении ПНС по поверхностям скольжения подпорной стены, режущего инструмента и КВ, что свидетельствует о схожести начальных и граничных условий. Рабочие поверхности подпорной стены, режущего инструмента и элементарной подпорной стены также обладают схожими свойствами (рисунок 3).

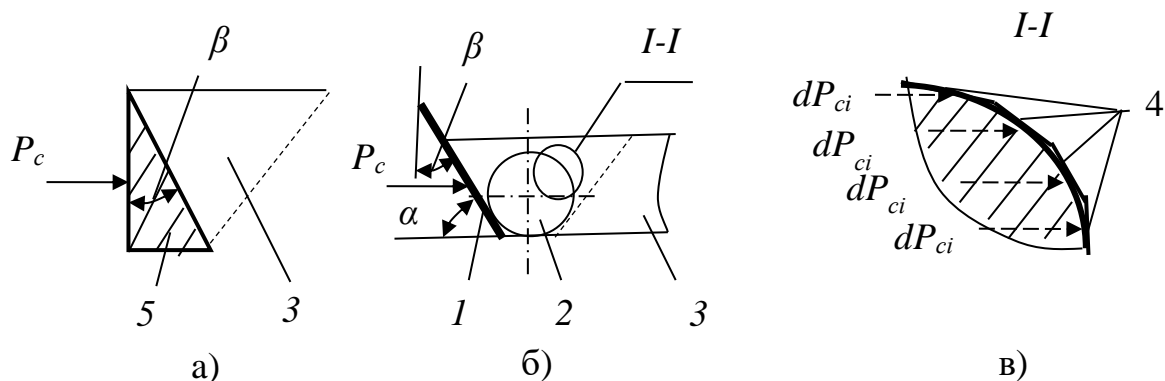


Рисунок 3 - Схема взаимодействия грунта: а) - с подпорной стеной; б) - с режущим инструментом; в) – элементарными подпорными стенами на поверхности КВ P_c – сила резания, dP_{ci} – элементарная сила резания, α – угол резания, β – угол наклона рабочей поверхности, 1 – режущий инструмент, 2 – КВ, 3 – грунт, 4 – элементарные подпорные стены, 5 - подпорная стена

Резание грунта представляет собой отделение слоя грунта с КВ определенной толщины от основного массива режущим инструментом рабочего органа ЗМ с затратой энергии на образование элементной прорези разрушения.

Объект исследования: резание грунтов с каменистыми включениями рабочими органами землеройных машин.

Предмет исследования: теория резания и закономерности разрушения грунтов с каменистыми включениями рабочими органами землеройных машин.

Методы исследования: использованы методы системного подхода, системного анализа, математической статистики и теории вероятностей, математического моделирования, систематизация, классификация, одно и многофакторный эксперименты, статистическое моделирование.

В связи с трудностью учета всех множества факторов, влияющих на процесс резания грунта, аналитическое определение силы сопротивления грунта резанию производится приближенно. В разработанной математической модели влияние скорости резания грунта не учитывается, в связи с тем, что диапазоны изменения скорости резания, наблюдаемые в производственных условиях, не вызывают появления в грунте явления вязкости.

Геометрические форма, размер и глубины залегания КВ в массиве грунта характеризуются стохастичностью, расположение центра тяжести КВ относительно прорези разрушения также имеет случайный характер (рисунок 2). С появлением КВ однородность заполнителя изменяется, но при этом не нарушаются прочные структурные связи между мелкими минеральными частицами и с поверхностью КВ грунта, последнее становится концентратором напряжений, очагом повышения НДС грунта. В связи с этим условно выделяются НДС однородной части (заполнителя) и НДС вокруг КВ при действии силы резания, в таком случае, общая сила сопротивления грунта с КВ резанию, определяется зависимостью (9):

$$P_{dm} = P_{rh} + P_{re} + P_{rg}, \quad (9)$$

где P_{rh} – сила сопротивления резанию однородной зоны (заполнителя), P_{re} – сила сопротивления резанию каменной зоны, P_{rg} – сила сопротивления КВ выталкиванию из зоны разрушения.

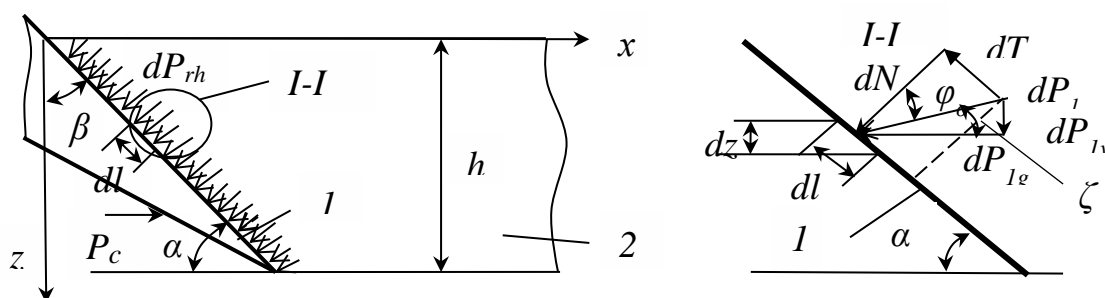


Рисунок 4 - Расчетная схема резания однородного грунта 1 – режущий инструмент, 2 – грунт, α – угол резания, β – угол наклона режущего инструмента, h – глубина резания, P_c – сила резания, dP_{rh} – элементарные силы сопротивления грунта резанию, dl – элементарная длина РИ, dN – нормальная компонента, dT – касательная компонента, dP_{lg} – касательная компонента к траектории резания, dP_{lv} – нормальная компонента к траектории резания, ϕ_o , ζ – угол отклонения равнодействующей силы от нормальной компоненты, и от касательной к траектории резания

При отсутствии КВ, грунт становится однородным, второе и третье слагаемые (9) равны нулю, тогда определяем силу сопротивления однородного (заполнителя) грунта резанию режущим инструментом рабочего органа ЗМ (рисунок 4).

Под действием силы резания грунт испытывает такие виды деформации, как уплотнение, сжатие, смятие, сдвиг, и доводится до ПНС, которое характеризуется наступлением в грунте такого состояния, что малейшее увеличение силы резания вызывает разрушение грунта по множественным плоскостям скольжения, принимается, что ϕ_o равен углу внешнего трения. Разрушение носит пространственный характер, имеются боковые стороны

прорези разрушения грунта. При свободном резании $n_s = 0$, при полублокированном резании $n_s = 1$, при блокированном резании $n_s = 2$.

Общий объем состоит из объема разрушенного грунта центральной части и боковой части прорези разрушения (10):

$$V_{dm} = V_c + n_s V_s, \quad (10)$$

$$\eta_{sp} = \frac{n_s V_s}{V_c}, \quad (11)$$

где V_c – объем центральной части прорези, V_s – объем боковой части прорези, n_s – количество боковых сторон разрушения, η_{sp} – коэффициент пространственности.

Сила сопротивления грунта в боковых расширениях прорези разрушения определяется в предположении, что сила сопротивления резанию и объем разрушенного грунта, находятся в функциональной зависимости и определяется (12), а общая сила сопротивления грунта определяется формулой (13):

$$P_{rs} = P_{rc} \eta_{sp}, \quad (12)$$

$$P_{rc} (1 + \eta_{sp}) = \begin{cases} P_{dm} = P_{rh}, & \text{при отсутствии КВ} \\ P_{dm} = P_{rh} + P_{re} + P_{rg}, & \text{при наличии КВ} \end{cases} \quad (13)$$

где P_{rc} – сила сопротивления резанию центральной части прорези разрушения, η_{sp} – коэффициент пространственности, P_{rh} – сила сопротивления резанию однородной зоны, P_{re} – сила сопротивления резанию каменистой зоны, P_{rg} – сила сопротивления КВ выталкиванию из зоны разрушения.

Сила сопротивления резанию центральной части прорези разрушения определяется с применением предельной нагрузки пассивного давления грунта, определенного В. В. Соколовским в условиях плоской задачи, на основе теории ПНС сыпучей среды (14),(15),(16).

Сила сопротивления однородного (заполнителя) грунта определяется зависимостью (17):

$$\sigma_n + H = (\gamma h + p + H) a_\beta, \quad (14)$$

$$|\tau_n| = (\sigma_n + H) \operatorname{tg} \varphi_0, \quad (15)$$

$$H = C \operatorname{ctg} \varphi, \quad (16)$$

$$P_{rh} = \left[b \sqrt{\left(A - \frac{Hh}{\sin \alpha} \right)^2 + (A \tan \varphi_0)^2 \sin(\alpha + \varphi_0)} \right] (1 + \eta_{sp}), \quad (17)$$

$$A = \frac{a_{\beta i} (0,5 \gamma h^2 + ph + Hh)}{\sin \alpha},$$

где σ_n , τ_n – предельные приведенные нормальное и касательное напряжение, соответственно, H – временное сопротивление всестороннему равномерному растяжению, γ – объемный вес грунта, h – глубина резания, p – пригрузка, $a_{\beta i}$ – коэффициент угла наклона подпорной стены, φ_0 – угол внешнего трения, C – сцепление, φ – угол внутреннего трения, b – ширина резания, α – угол резания, η_{sp} – коэффициент пространственности.

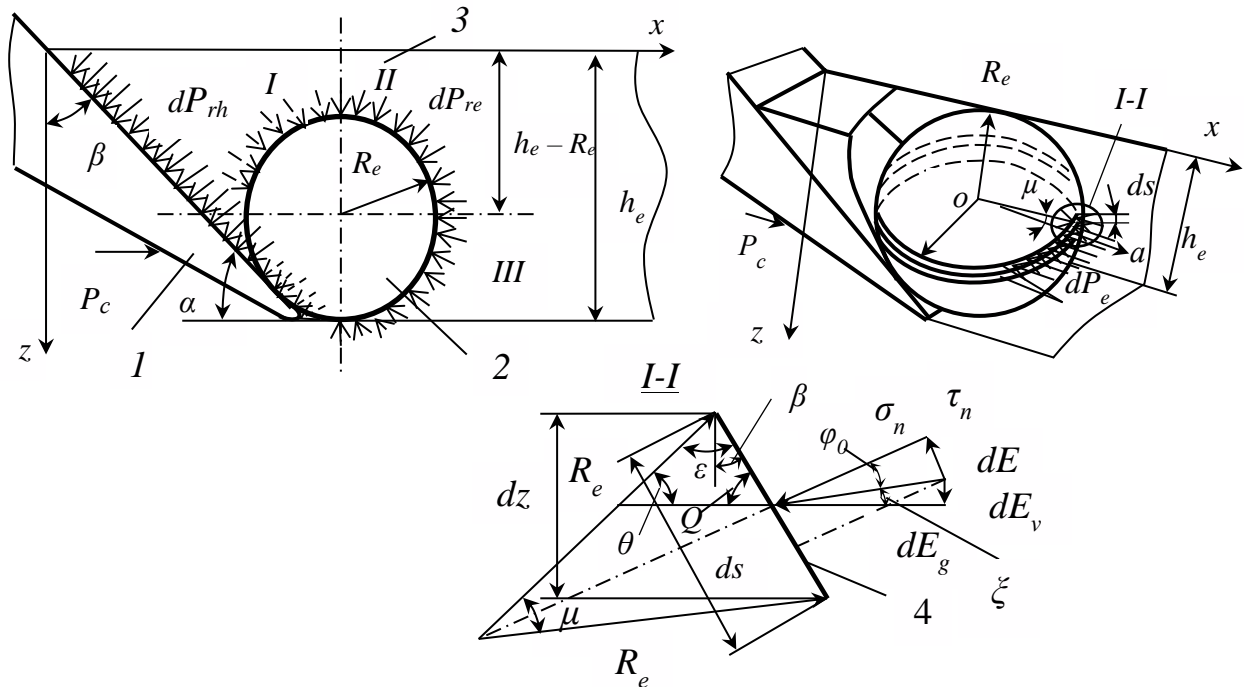


Рисунок 5 - Расчетная схема для определения силы сопротивления резанию грунта, содержащего шаровидное КВ 1- РИ, 2 – КВ, 3 – грунт, 4 – элементарный пояс, I – зона заполнителя, II , III – каменистая зона действия пассивного давления грунта, α – угол резания, β – угол наклона от вертикали, h_e – глубина залегания КВ, P_c – сила резания грунта, dP_{re} – элементарные силы сопротивления грунта резанию, R_e – радиус КВ, ds – элементарная длина, μ , ε , θ , Q – соответствующие углы элементарной подпорной стены, φ_0 , ξ – угол отклонения равнодействующего напряжения от нормальной компоненты и от касательной к траектории резания, соответственно

Подпорная стена может находиться в крутой, промежуточной, пологой, ломаной областях в зависимости от β (рисунок 3а, б), и для обеспечения геометрического подобия, для определения граничных значений областей

нахождения, поверхность КВ разбиваются на элементарные пояса с приложением к ним предельной нагрузки пассивного давления грунта (рисунок 5).

Сила сопротивления резанию грунта, содержащего шаровидное КВ в соответствии с (9) определяется зависимостью (рисунок 5) (18):

$$P_{dm} = \left[b \sqrt{\left(A - \frac{Hh}{\sin \alpha} \right)^2 + (A \tan \varphi_0)^2 \sin(\alpha + \varphi_0)} \right] (1 + \eta_{sp}) + \sum_{j=1}^{j=4} \left[2\pi R_e^2 k_c \sin\left(\frac{\mu}{2}\right) \sum_{i=1}^{i=n} dE_i (\cos \theta_i + \cos \theta_{i+1}) \cos \xi_i \right] + \frac{4\pi R_e^3 \gamma_e f_e}{3}, \quad (18)$$

$$A = \frac{a_{\beta i} (0,5 \gamma h^2 + ph + Hh)}{\sin \alpha},$$

где b – ширина резания, H – временное сопротивление всестороннему равномерному растяжению, h – глубина резания, α – угол резания, η_{sp} – коэффициент пространственности, $a_{\beta i}$ – коэффициент угла наклона подпорной стены, γ – объемный вес грунта, p – пригрузка, R_e – радиус КВ, k_c – коэффициент длины элементарного пояса, μ , θ – соответствующие углы элементарной подпорной стены, φ_0 , ξ – угол отклонения равнодействующего от нормальной компоненты и от касательной к траектории резания, соответственно, γ_e – объемный вес КВ, f_e – коэффициент трения КВ.

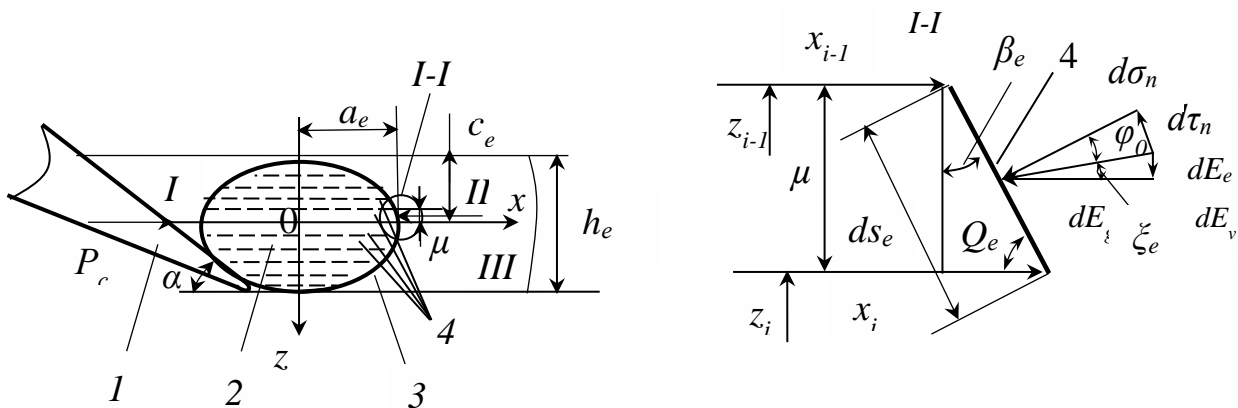


Рисунок 6 - Схема резания грунта, содержащего эллипсоидное КВ 1 – режущий инструмент, 2 – КВ, 3 – грунт, 4 – элементарные пояса, I, II, III – зоны действия пассивного давления грунта, P_c – сила резания, α – угол резания, h_e – глубина залегания КВ, a_e – большая полуось, c_e – маленькая полуось, $d\sigma_n$, $d\tau_n$, dE_e , dE_g , dE_v – нормальная, касательная, равнодействующая, горизонтальная, вертикальная компоненты пассивного давления грунта, μ – шаг разбивки секущей плоскости, ds_e – элементарная длина, β_e – угол отклонения от вертикали, Q_e – угол отклонения от горизонтали, φ_0 , ξ – угол отклонения равнодействующего напряжения от нормальной компоненты и от касательной к траектории резания, соответственно

Сила сопротивления резанию грунта, содержащего эллипсоидное КВ в соответствии с (9) определяется зависимостью (рисунок 6) (19):

$$P_{dm} = \left[b \sqrt{\left(A - \frac{Hh}{\sin \alpha} \right)^2 + (A \tan \varphi_0)^2 \sin(\alpha + \varphi_0)} \right] (1 + \eta_{sp}) +$$

$$+ \pi k_c \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=4}^j \sqrt{d\sigma_{n_i}^2 + d\tau_{n_i}^2} \cos \xi_{e_i} \left[3(x_{ic} + y_{ic}) - \sqrt{(3x_{ic} + y_{ic})(x_{ic} + 3y_{ic})} \right] \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + \mu^2} + \quad (19)$$

$$+ \frac{4\pi a_e b_e c_e \gamma_e f_e}{3}, A = \frac{a_{\beta i} (0,5h^2 + ph + Hh)}{\sin \alpha},$$

где b – ширина резания, H – временное сопротивление всестороннему равномерному растяжению, h – глубина резания, α – угол резания, φ_0 – угол отклонения равнодействующей силы от нормальной компоненты, η_{sp} – коэффициент пространственности, $a_{\beta i}$ – коэффициент угла наклона подпорной стены, γ – объемный вес грунта, p – пригрузка, C – сцепление, φ – угол внутреннего трения, k_c – коэффициент длины элементарного пояса, $d\sigma_n$, $d\tau_n$ – нормальная, касательная компоненты пассивного давления грунта, ξ_e – угол отклонения равнодействующего напряжения от касательной к траектории резания, μ – шаг разбивки секущей плоскости, a_e – большая полуось, b_e , c_e – маленькие полуоси, f_e – коэффициент трения КВ.

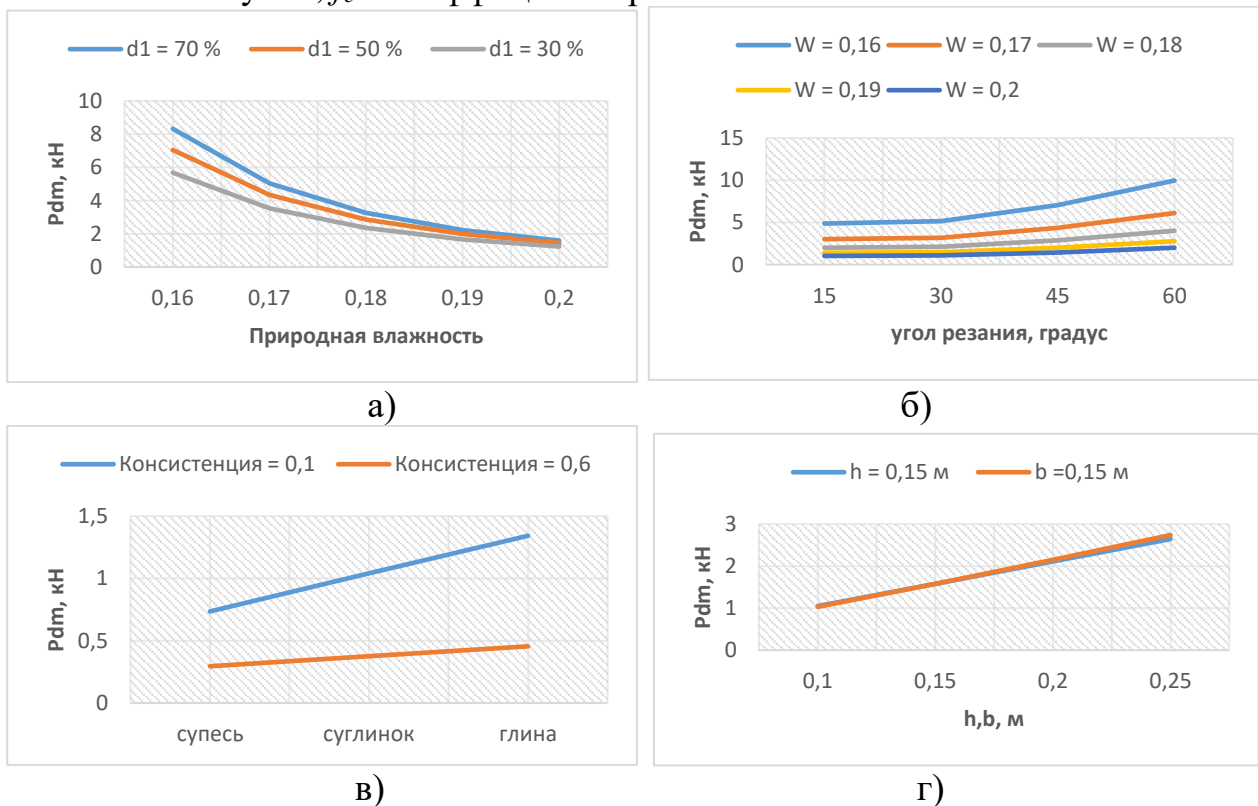


Рисунок 7 – Зависимость силы сопротивления резанию грунта: а) – от природной влажности, б) – от угла резания, в) – от вида грунта, г) – глубины и ширины резания

Анализ зависимостей (18), (19) показывает, что на силу сопротивления резанию влияют параметры прочности и резания грунта, размеры и форма КВ.

Анализ рисунка 7 показывает, что на значение силы сопротивления резанию природная влажность грунта оказывает нелинейное отрицательное влияние (рисунок 7, а), угол резания – нелинейное положительное влияние, оптимальным углом резания можно принять $25...30^{\circ}$ (рисунок 7, б), с увеличением пластичности грунта, глубины и ширины резания сила сопротивления резанию повышается, причем влияние глубины резания на силу сопротивления происходит нелинейным образом (рисунок 7, г).

На базе моделей McKeyes - Ali разработана трехмерная модель прорези разрушения однородного грунта и грунта, содержащего КВ.

Для подтверждения результатов теоретических исследований, установления физической сущности и закономерностей разрушения грунтов, содержащих КВ и выработки рекомендаций по повышению эффективности ЗМ проведены экспериментальные исследования, результаты которых приведены в четвертой главе **«Экспериментальные исследования процесса резания грунтов с каменистыми включениями рабочими органами землеройных машин»**.

Экспериментальные исследования проведены в научной лаборатории кафедры технологии технических процессов Таласского государственного университета. Задачами экспериментальных исследований являются: разработка программы проведения экспериментальных исследований, изготовление стенда и формирование условий для физического исследования процесса резания грунта, содержащего КВ режущим инструментом рабочего органа, реализация плана эксперимента, анализ его результатов и установление основных закономерностей процесса разрушения грунтов с КВ, геометрических параметров прорези разрушения и выработка рекомендаций по повышению эффективности ЗМ.

Основным инструментом реализации программы и достижения целей экспериментальных исследований является физическое моделирование процесса резания грунта, содержащего КВ. Приближенное физическое моделирование резания грунта с КВ проводится с соблюдением разработанных критериев подобия, прочность модельного грунта контролируется по показателю его плотности. На рисунке 8 показаны специальная стендовая установка, совокупность оборудования, приспособлений, измерительных приборов, используемых при моделировании и резании грунта с КВ режущим инструментом, в виде простого клина, т.к. он является прототипом режущей части рабочего органа многих ЗМ (экскаваторов, рыхлителей и др.).

Стендовая установка позволяет физически моделировать процесс разрушения грунта с различным КВ, разными режущими инструментами при изменяющихся режимах резания грунта. На ней можно получить закономерности и физическую картину процесса резания однородного (заполнителя) грунта и грунта, содержащего КВ относительно в короткое время с достаточной для теории и практики точностью. Необходимые

гранулометрический состав, структура, физические и прочностные свойства моделируемого грунта обеспечиваются выполнением операций, требований соответствующих критериев подобия, ГОСТов и ЗР микроагрегатов и минеральных частиц.



а)



б)



в)

Рисунок 8 – а) - общий вид станда для резания грунта с КВ с насосной станцией, б) – режущий инструмент, в) – формирование модельного грунта

По результатам реализации однофакторного эксперимента установлена физическая сущность разрушения грунта режущим инструментом рабочего органа (рисунок 9).

В начальный момент происходит контакт режущего инструмента с грунтом, происходит его предварительное уплотнение, далее под действием режущего инструмента грунт начинает сжиматься, появляются очаги будущих поверхностей скольжения (*I* стадия), во второй стадии деформации в структуре грунта увеличивается количество очагов поверхностей сдвига, наступает ПНС в определенном объеме грунта, и в дальнейшем происходит разрушение объема грунта по многочисленным поверхностям сдвига (*III* стадия). В *IV* стадии разрушенный объем грунта движется по поверхности РИ и надвигается на поверхность грунта. Анализ стадии разрушения грунта показывает, что в стадиях уплотнения, сжатия грунта (*I*, *II* стадии) изменение силы резания происходит близко линейной зависимости, подтверждающее корректность применения положений теории упругости в пределах пропорциональности для теоретического определения силы сопротивления грунта резанию. Следует отметить вариативность значений силы резания грунта во времени, такое связано, очевидно из-за изменчивости прочностных свойств грунта.

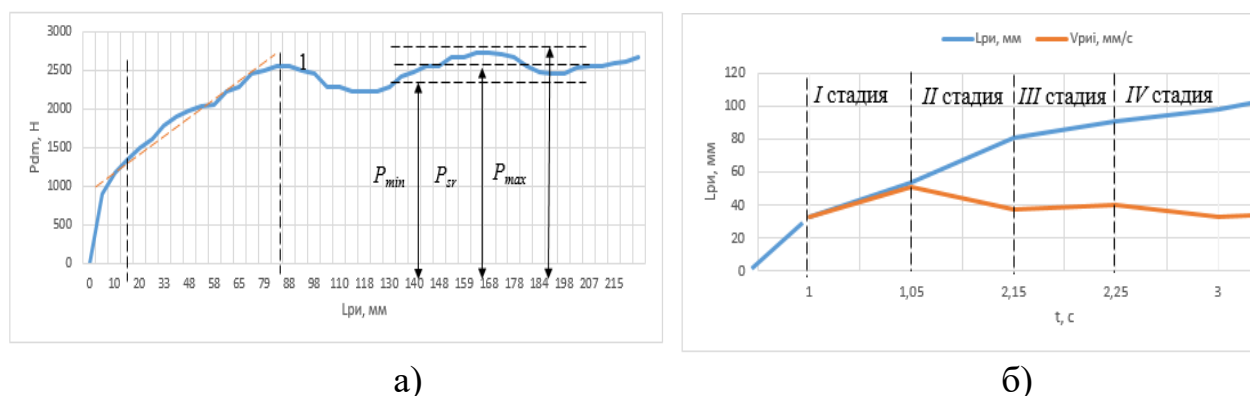


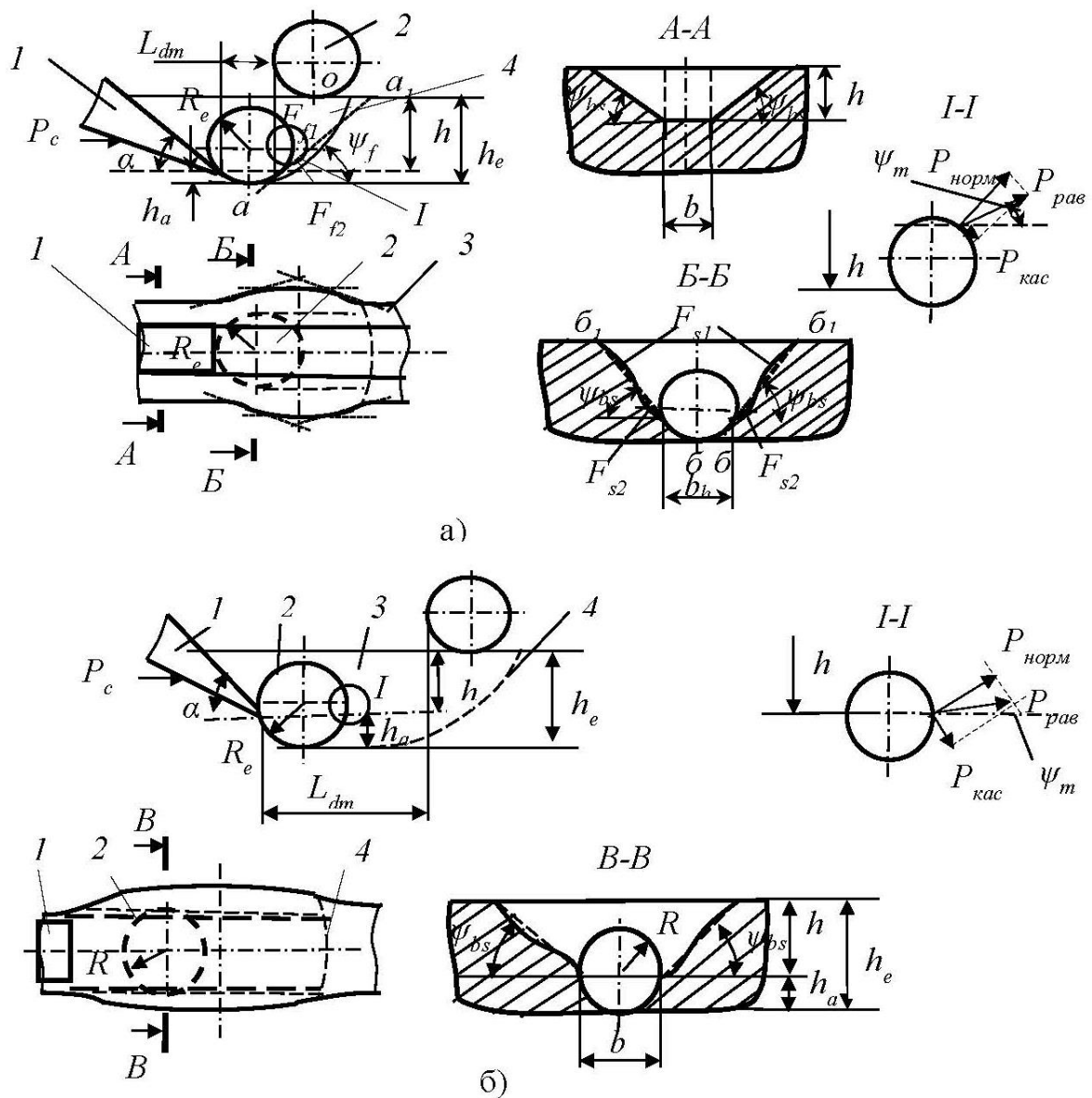
Рисунок 9 – Изменение силы резания и стадии разрушения грунта 1- касательная, *I* стадия – сжатие грунта, начало сдвига грунта, *II* стадия - увеличение очагов сдвига грунта, наступление ПНС, *III* стадия – разрушение грунта, *IV* стадия – волочение и надвигание призмы разрушения грунта

По результатам резания грунта, содержащего близко шаровидное КВ получена трехмерная модель прорези разрушения грунта и ее геометрические параметры, при симметричном расположении центра тяжести КВ относительно ширины резания (рисунок 10). Передние и боковые поверхности прорези имеют криволинейное очертание, если провести прямую плоскость через точки разрушения на нижней части прорези (точка a , b) и расширяющейся части (точка a_1 , b_1), то можно определить углы наклона поверхности переднего ψ_f и бокового разрушения ψ_s .

Таким образом криволинейные поверхности прорези разрушения можно аппроксимировать прямыми поверхностями, имеющими близкий и более

простой вид к исходным поверхностям, при этом в определении не вносится существенной погрешности, т.к. положительные и отрицательные отклонения от прямой поверхности взаимно уничтожаются.

С увеличением глубины залегания КВ относительно режущей кромки, которая оценивается коэффициентом глубины залегания КВ (k_{ha}) изменяется траектория движения КВ в процессе резания грунта. Вследствие этого значительно возрастают силовые и энергетические затраты разрушения грунта с КВ рабочим органом ЗМ. Следует отметить, что в лобовой части КВ появляется ядро из уплотненного грунта, причем с увеличением глубины залегания КВ относительно режущей кромки, размеры ядра увеличиваются. Очевидно, что с увеличением глубины залегания камня возрастает активная длина элементарного пояса, которая оценивается коэффициентом длины элементарного пояса на поверхности КВ – k_c .



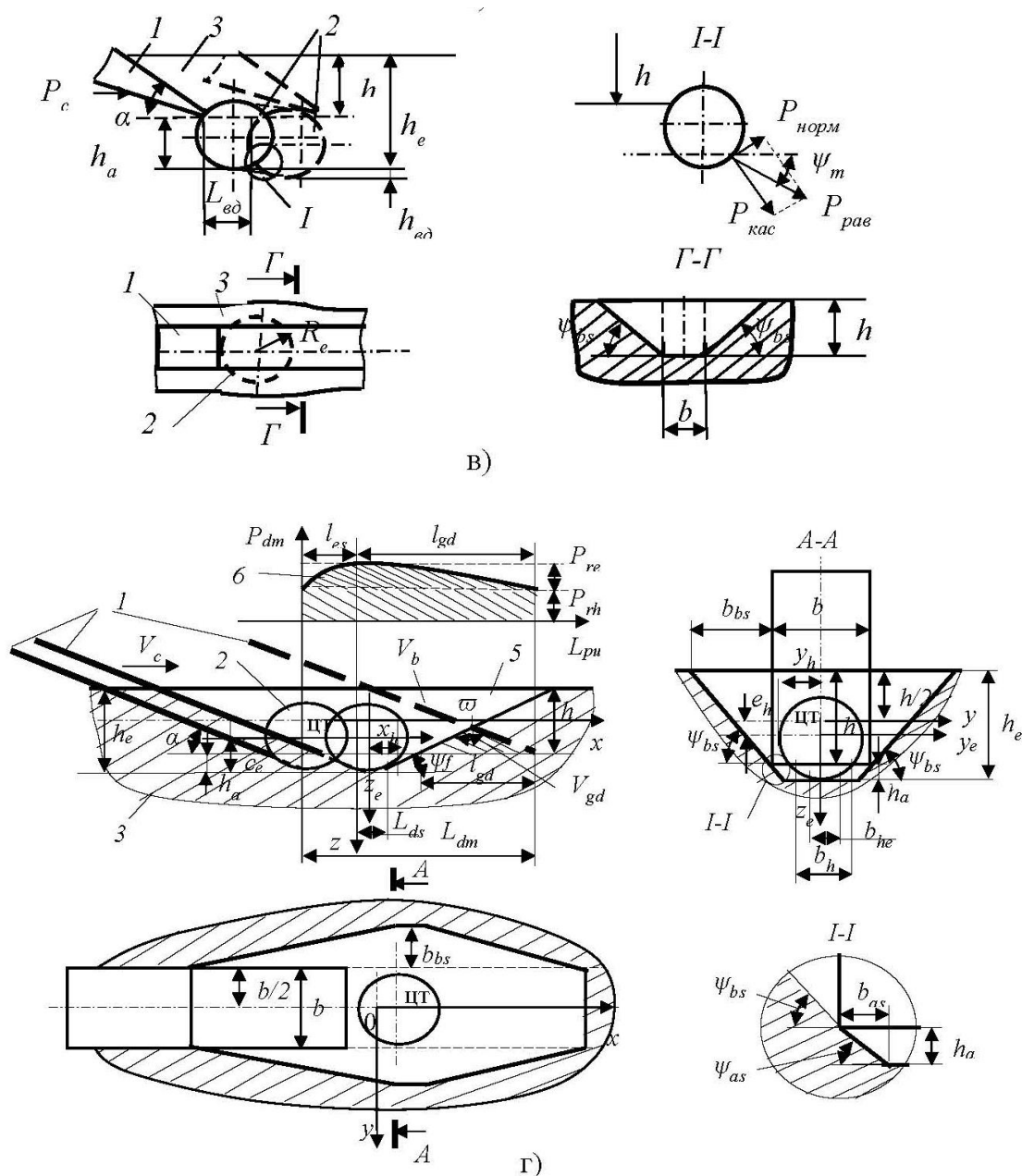


Рисунок 10 - Трехмерная модель прорези разрушения грунта: а) интенсивное разрушение; б) экстенсивное разрушение; в) разрушение с вдавливанием КВ; г) интенсивное разрушение грунта с эллипсоидным КВ 1 – режущий инструмент, 2 – КВ, 3- грунт, 4 - поверхность сдвига, 5 – прорезь разрушения, 6 – график силы сопротивления грунта резанию, P_c – сила резания, $P_{норм}$ – нормальная сила, $P_{кас}$ – касательная сила, $P_{рав}$ – равнодействующая сила, V_c – скорость резания, L_{dm} – длина резания, L_{ds} – длина прорези разрушения, α – угол резания, b – ширина резания, b_h – ширина резания, измененная под влиянием камня, h – глубина резания h_e – глубина залегания, h_a – высота дополнительной области, ψ_f – фронтальный угол разрушения, ψ_m – угол между направлением резания и равнодействующей силой, ψ_{bs} – угол сдвига в боковой части основной области, ψ_{as} – угол сдвига в боковой части дополнительной области, e_h – эксцентриситет по глубине резания, b_{he} – ширина резания дополнительной области, $a-a_1$, $b-b_1$ – аппроксимирующие плоскости

В целях систематизации многообразия разрушения грунта, в зависимости от координаты действия режущей кромки на КВ по результатам опыта принимается что, когда $k_{ha} = 0 \dots 0,25$, грунт разрушается с интенсивным (быстрым) выкатыванием КВ на дневную поверхность грунта (рисунок 10, а), когда $k_{ha} = 0,25 \dots 1,75$ грунт разрушается с экстенсивным (медленным) выкатыванием камня на поверхность грунта (рисунок 10, б), и когда $k_{ha} = 1,75 \dots 2,0$ грунт разрушается с вдавливанием камня в массив грунта (рисунок 10, в).

Анализ рисунка 10 показывает, что основной особенностью резания является то, что на резание грунта с КВ потребуется часть пути РИ, при котором затрачивается энергия (работа) на образование прорези разрушения.

Длина резания – это часть пути режущего инструмента (отрезок), в пределах которого происходит локальное повышение силы резания до максимального значения и последующим снижением ее до уровня резания заполнителя грунта.

Траектория движения КВ представляет собой близко прямую линию под углом к дневной поверхности грунта (рисунок 10, а), комбинированную линию: параллельная к дневной поверхности, далее под углом к последней (рисунок 10, б), и близко прямую линию под углом к массиву грунта (рисунок 10, в).

Анализ рисунка 10, а, б, в показывает, что чем выше точка воздействия режущей кромки на КВ, вектор равнодействующей силы на поверхности КВ начинает поворачиваться в сторону вглубь массива грунта, равнодействующая сила от выталкивающей силы КВ из массива грунта превращается в вдавливающую силу. Величина максимальной силы резания соответствует наступлению в грунте ПНС, и дальнейшее малейшее повышение силы резания вызывает разрушение грунта по многочисленным поверхностям сдвига с образованием прорези разрушения.

Длина резания является скалярной величиной и определяется выражением, составляющие которого устанавливаются опытным путем (20):

$$L_{dm} = l_{ess} + l_{gd}, \quad (20)$$

где l_{ess} – путь режущего инструмента, соответствующий наступлению ПНС, l_{gd} – путь режущего инструмента, соответствующий зоне сдвиговых и предварительной деформации грунта.

В таком случае энергия (работа), затрачиваемая на разрушение грунта с КВ, в соответствии с (9), определяется зависимостью (21):

$$\mathcal{E}_{dm} = \mathcal{E}_{rh} + \mathcal{E}_{re} + \mathcal{E}_{rg}, \quad (21)$$

где \mathcal{E}_{rh} – энергия разрушения зоны заполнителя грунта, \mathcal{E}_{re} – энергия разрушения каменистой зоны, \mathcal{E}_{rg} – энергия вывода КВ из зоны действия РИ.

Прорезь разрушения условно состоит из центральной части (c) и боковой части (s), основной области (b), дополнительной области (a), представляется совокупностью правильных геометрических фигур: трапецеидальной призмы, прямоугольной треугольной призмы, прямоугольной треугольной пирамиды. Посредством схематизации поверхностей разрушения определены следующие геометрические параметры прорези разрушения грунта с КВ: угол резания (α), глубина резания (h), ширина резания (b), глубина залегания КВ (h_e), глубина залегания КВ относительно режущей кромки (h_a), длина резания (L_{dm}), фронтальный угол сдвига (ψ_f), боковой угол сдвига основной области (ψ_{bs}), боковой угол сдвига дополнительной области (ψ_{as}), ширина резания, изменяющаяся под влиянием КВ (b_h), длина прорези (L_{ds}), ширина прорези (b_{he}), длина вдавливания КВ (L_{ed}). Погрешность между теоретической и экспериментальной силами сопротивления грунта, содержащего КВ, разрушающегося по различным видам составляет в пределах 15 %.

Для установления математических регрессионных моделей локальной энергоемкости разрушения грунтов с КВ разработан план полно факторного эксперимента (ПФЭ) по резанию грунтов с КВ клиновидным режущим инструментом. Зависимой переменной – результативным признаком (откликом), выступает сила сопротивления грунта резанию, длина резания и боковой угол разрушения грунта, содержащего КВ, а независимыми управляемыми факторами, влияющими на процесс резания являются: плотность грунта, ρ , т/м³ – x_1 (интегральная характеристика прочности, физического состояния грунта), средние размеры радиуса шаровидного КВ, R_e , м – x_2 , и ширина резания, b , м – x_3 . Из априорной информации следует, что оптимальной глубиной резания можно принять глубину резания $h = 0,15$, а оптимальным углом резания грунта с КВ установлен $\alpha = 30^\circ$.

По результатам реализации ПФЭ сформирована эмпирическая статистическая совокупность по резанию супеси, суглинка и глины, содержащие 30 %, 50 %, 73 % минеральных частиц крупнее 2 мм, имеющие полутвердую и мягко пластичную консистенцию, которые разрушаются интенсивным, экстенсивным выкатыванием и вдавливанием КВ в массив грунта. Путями снижения энергии разрушения грунтов с КВ можно назвать возможности: перехода из экстенсивного разрушения в интенсивное разрушение грунта и обход поверхности КВ при вдавливании КВ в массив грунта режущим инструментом рабочего органа ЗМ.

Пятая глава **«Прогнозирование локальной энергоемкости разрушения грунтов с каменистыми включениями рабочими органами землеройных машин»** посвящена разработке математических регрессионных моделей локальной энергоемкости разрушения грунтов с КВ рабочим органом ЗМ.

Проводится сравнительный анализ двухмерных моделей прогнозирования силы сопротивления резанию однородного суглинка по методам Ю. А. Ветрова, McKyes - Ali, К. А. Артемьева, В. И. Баловнева и автора, между трехмерными моделями прогнозирования силы сопротивления однородного грунта автора и McKyes, Perumpral - Grisso - Desai, между методами расчета силы сопротивления

грунта с КВ Э. Кравцова и автора. Погрешности между методами прогнозирования силы сопротивления автора, Э. Кравцова, вызвана тем, что сила сопротивления резанию по методу Э. Кравцова определена без учета влияний угла, ширины резания, особенностей нормальной и касательной компонентов пассивного давления грунта.

Локальная энергоёмкость разрушения грунта с интенсивным или экстенсивным выкатыванием КВ на дневную поверхность определяется зависимостью (22):

$$E_{dm_{u,\varepsilon}} = \frac{\mathcal{E}_{dm_{u,\varepsilon}}}{V_{dm_{u,\varepsilon}}}, \quad (22)$$

где $\mathcal{E}_{dm_{u,\varepsilon}}$ - энергия разрушения грунта с интенсивным или экстенсивным выкатыванием КВ; V_{dm} - объем прорези разрушения грунта с КВ.

Для вида разрушения с внедрением КВ в массив грунта локальная энергоёмкость разрушения определяется зависимостью (23):

$$E_{dm_{\varepsilon}} = \frac{\mathcal{E}_{rh}}{V_b} + \frac{\mathcal{E}_{\varepsilon\delta}}{V_{am}}, \quad (23)$$

где \mathcal{E}_{rh} - энергия разрушения зоны заполнителя, $\mathcal{E}_{\varepsilon\delta}$ - энергия вдавливания КВ, V_b - объем прорези разрушения основной области, V_{am} - объем деформированного грунта при вдавливании КВ.

Локальную энергоёмкость разрушения грунта с интенсивным или экстенсивным выкатыванием КВ можно определить зависимостью (24):

$$\mathcal{E}_{dm_{u,\varepsilon}} = (P_{rh} + P_{rg})L_{dm} + \sum_{i=1}^{i=n} dp_{rei} dl_{dmi}, \quad (24)$$

где P_{rh} - сила сопротивления зоны заполнителя, P_{rg} - сила сопротивления КВ выведению из зоны резания, L_{dm} - длина резания, dp_{rei} - элементарные силы сопротивления каменистой зоны, dl_{dmi} - элементарные длины резания каменистой зоны.

Значение элементарной силы сопротивления dp_{rei} каменистой зоны аппроксимируется уравнением вида (25):

$$dp_{re} = k_{pre} P_{re}, \quad (25)$$

где k_{pre} - коэффициент элементарной силы сопротивления каменистой зоны, P_{re} - сила сопротивления каменистой зоны резанию.

В случае, когда грунт разрушается с внедрением КВ в вглубь массива, суммарная энергия разрушения условно разделяется на энергию разрушения заполнителя – \mathcal{E}_{rh} и на энергию сопротивления внедрению КВ в массив грунта – $\mathcal{E}_{\epsilon\delta}$ (26):

$$\mathcal{E}_{dm_{\epsilon\delta}} = \mathcal{E}_{rh} + \mathcal{E}_{\epsilon\delta} = P_{rh} L_{\epsilon\delta} + \sum_{i=1}^{i=n} dp_{\epsilon\delta i} dl_{\epsilon\delta i}, \quad (26)$$

где P_{rh} – сила сопротивления зоны заполнителя, $L_{\epsilon\delta}$ – длина вдавливания КВ, $dp_{\epsilon\delta i}$ – элементарные силы сопротивления вдавливанию, $dl_{\epsilon\delta i}$ – элементарные длины вдавливания КВ.

Общий объем прорези разрушения грунта с КВ (рисунок 10) равен (27):

$$V_{dm} = V_b + V_a + V_{gd}, \quad (27)$$

$$V_b = V_{bc} + V_{bs}, \quad V_a = V_{ac} + V_{as}, \quad (28)$$

$$V_{bc} = \frac{bh^2(ctg\alpha + ctg\psi_f)}{2} + A_v bh, \quad (29)$$

$$A_v = h_a(ctg\alpha + ctg\psi_f) + L_{de} \approx L_{dm}, \quad (30)$$

$$V_{bs} = \frac{b_{bs}h^2(ctg\alpha + ctg\psi_f)}{6} + \frac{b_{bs}h}{2} A_v, \quad (31)$$

$$V_{ac} = b_{he}h_a \left(\frac{A_v + L_{de}}{2} \right), \quad (32)$$

$$V_{as} = \frac{2b_{as}h_a^2(ctg\alpha + ctg\psi_f) + 3b_{as}h_a L_{de}}{6}, \quad (33)$$

$$V_a = V_{ac} + n_s V_{as}, \quad (34)$$

$$V_{gd} = \frac{l_{gd}^2 \sin\psi_f \sin\alpha}{2 \sin\varpi}, \quad (35)$$

$$b_{he} = \begin{cases} b - 2b_{as}, & \text{когда } b_h < b \\ b_h - 2b_{as}, & \text{когда } b_h \geq b \end{cases}, \quad (36)$$

$$b_{bs} = hctg\psi_{bs}, \quad b_{as} = h_a ctg\psi_{as}, \quad (37)$$

$$\eta_{sp} = \frac{n_s V_{bs}}{V_{bc} + V_a + V_{gd}}, \quad (38)$$

где V_b - объем прорези основной области, V_a - объем прорези дополнительной области, V_{gd} - объем опережающее деформированного грунта, V_{bc} - объем прорези основной области центральной части, V_{bs} - объем прорези основной области боковой части, V_{ac} - объем прорези дополнительной области центральной части, V_{as} - объем прорези дополнительной области боковой части, b – ширина резания, h – глубина резания, α - угол резания, ψ_f - фронтальный угол разрушения, h_a – высота дополнительной области, L_{de} – длина прорези разрушения, L_{dm} – длина резания грунта, b_{bs} , ψ_{bs} – ширина, угол сдвига прорези боковой части основной области, соответственно, b_{as} , ψ_{as} – ширина, угол сдвига прорези боковой части дополнительной области, соответственно, b_h , b_{he} – ширина резания на уровне глубины резания, залегания КВ, соответственно, η_{sp} - коэффициент пространственности, n_s – количество боковой части прорези разрушения, l_{gd} , ϖ – путь режущего инструмента, угол опережающего сжатия грунта, соответственно.

Эмпирическая совокупность, образованная по результатам реализации ПФЭ, подвергается корреляционному, дисперсному и регрессионному анализу в современном программном комплексе «Statistica». Нормальное распределение исходных статистических данных проверяется критерием Колмогорова-Смирнова, однородность строчных дисперсий – критерием Кохрана, статистическая значимость коэффициентов регрессионной модели – критерием Стьюдента, в целом адекватность математических регрессионных моделей – критерием Фишера. Отсутствие мультиколлинеарности между коэффициентами регрессионной модели обеспечивается планом ПФЭ.

Математическая регрессионная модель локальной энергоемкости разрушения грунта, содержащего близко шаровидное (39), и математическая регрессионная модель коэффициента локальной энергоемкости разрушения грунта, содержащего эллипсоидное/эллипсоидно суженное КВ (40) установлены с использованием моделей:

$$E_{dm} = a_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_{31} + b_4 x_1 x_2 + b_5 x_1 x_3 + b_6 x_2 x_3 + b_7 x_1 x_2 x_3, \quad (39)$$

$$k_{f04} = a_0 + e^{b_0 + b_1 \rho + b_2 a_e + b_3 b}, \quad k_{f08} = a_0 + e^{b_0 + b_1 \rho + b_2 a_e + b_3 b} \quad (40)$$

где a_0 , b_0 – свободные коэффициенты, b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 , b_6 , b_7 - коэффициенты регрессионной модели.

Принятие упрощения о функциональной взаимосвязи удельных силовых и энергетических затрат разрушения грунта позволяет определить значение

коэффициента локальной энергоемкости разрушения грунта с эллипсоидным КВ (41) и с эллипсоидно суженным КВ (42):

$$k_{f04} = \frac{P_{dm04}}{P_{dm}}, \quad (41)$$

$$k_{f08} = \frac{P_{dm08}}{P_{dm}}, \quad (42)$$

где P_{dm} - сила сопротивления резанию грунта с шаровидным КВ; P_{dm04} – сила сопротивления резанию грунта с эллипсоидным КВ, P_{dm08} – сила сопротивления резанию грунта с эллипсоидно суженным КВ.

Таким образом с применением теоретико-экспериментального подхода можно установить математические регрессионные модели локальной энергоемкости разрушения грунтов, содержащих различные КВ, позволяющие прогнозировать удельные энергетические затраты разрушения грунтов с КВ (таблица 1-таблица 6), в зависимости от плотности грунта, размера КВ определенной геометрической формы и ширины резания.

Для определения локальной энергоемкости разрушения супеси, суглинка и глины, имеющие определенные консистенцию, содержание частиц крупнее 2 мм, форму КВ, вид разрушения, разработаны номограммы, некоторые из них приведены на рисунках 11- 14.

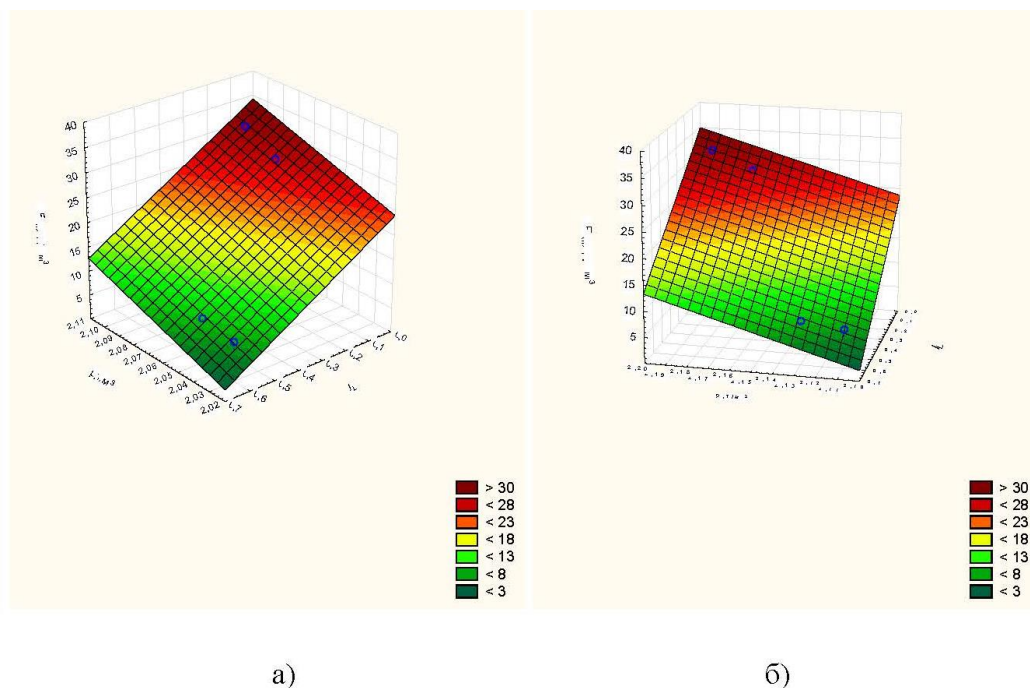


Рисунок 11 - Зависимость локальной энергоемкости разрушения от плотности и консистенции: а) супесь, содержание минеральных частиц крупнее 2 мм – 30 %; б) глина, содержание минеральных частиц крупнее 2 мм – 50 %

Таблица 1 – Параметры регрессионной модели локальной энергоемкости разрушения супесчаных грунтов с КВ

Название					I_p		$d_2, \%$	I_L	$\rho, \text{м/м}^3$	
<i>Супесь</i>					<i>0,07</i>		<i>30</i>	<i>0,1</i>	<i>2,06...2,1</i>	
y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	R	k_{ha}
E_{dmu}	17,399	-8,687	-2117,9	202,033	1156,834	-101,553	-25634,8	12761,85	1,0	0,25
$E_{dmэ}$	27,635	-14,242	-2745,01	399,958	1505,412	-200,835	-36922,9	18411,88	1,0	1,0
$E_{dmе\delta}$	94,161	-49,364	-10653,0	1617,694	5789,864	-776,531	-144968	72082,10	1,0	1,75
y				a_0	b_0	b_1	b_2	b_3	R	R^2
k_{f04}				-11,3216	2,4969	0,0051	-0,2372	0,0335	0,999	99,97
k_{f08}				-1,5596	1,1048	-0,091	-2,0784	0,2677	0,999	99,77

Таблица 2 – Параметры регрессионной модели локальной энергоемкости разрушения супесчаных грунтов с КВ

Название					I_p		$d_2, \%$	I_L	$\rho, \text{м/м}^3$	
<i>Супесь</i>					<i>0,07</i>		<i>30</i>	<i>0,6</i>	<i>2,03...2,07</i>	
y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	R	k_{ha}
E_{dmu}	7,723	-3,952	-841,587	14,924	460,382	-8,359	-4514,79	2323,976	1,0	0,25
$E_{dmэ}$	8,371	-4,382	-830,724	121,21	463,204	-61,795	-11190,9	5665,2	1,0	1,0
$E_{dmе\delta}$	30,018	-15,988	-3394,13	516,408	1875,273	-251,510	-46253,2	23346,59	1,0	1,75
y				a_0	b_0	b_1	b_2	b_3	R	R^2
k_{f04}				-10,9539	2,4663	0,0053	-0,2446	0,0345	0,999	99,97
k_{f08}				-18,5506	2,9574	0,0058	-0,2423	0,0333	0,999	99,97

Таблица 3 – Параметры регрессионной модели локальной энергоемкости разрушения суглинистых грунтов с КВ

Название					I_p		$d_2, \%$	I_L	$\rho, \text{м/м}^3$	
Суглинок					0,1536		30	0,1	2,06...2,1	
y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	R	k_{ha}
E_{dmu}	8,255	-4,151	-2656,2	35,57	1439,9	-18,176	-20144,5	9998,67	1,0	0,25
$E_{dmэ}$	101,347	-50,161	-5753,31	-550,418	2999,360	266,059	-14181,1	7246,542	1,0	1,0
$E_{dm\phi}$	65,041	-35,374	-14010,5	750,153	7548,804	-336,594	-119756	59371,29	1,0	1,75
y				a_0	b_0	b_1	b_2	b_3	R	R^2
k_{f04}				-12,9385	2,6109	0,0101	-0,2065	0,0272	0,99	99,91
k_{f08}				-22,0882	3,1161	0,0100	-0,2051	0,0268	0,99	99,915

Таблица 4 – Параметры регрессионной модели локальной энергоемкости разрушения суглинистых грунтов с КВ

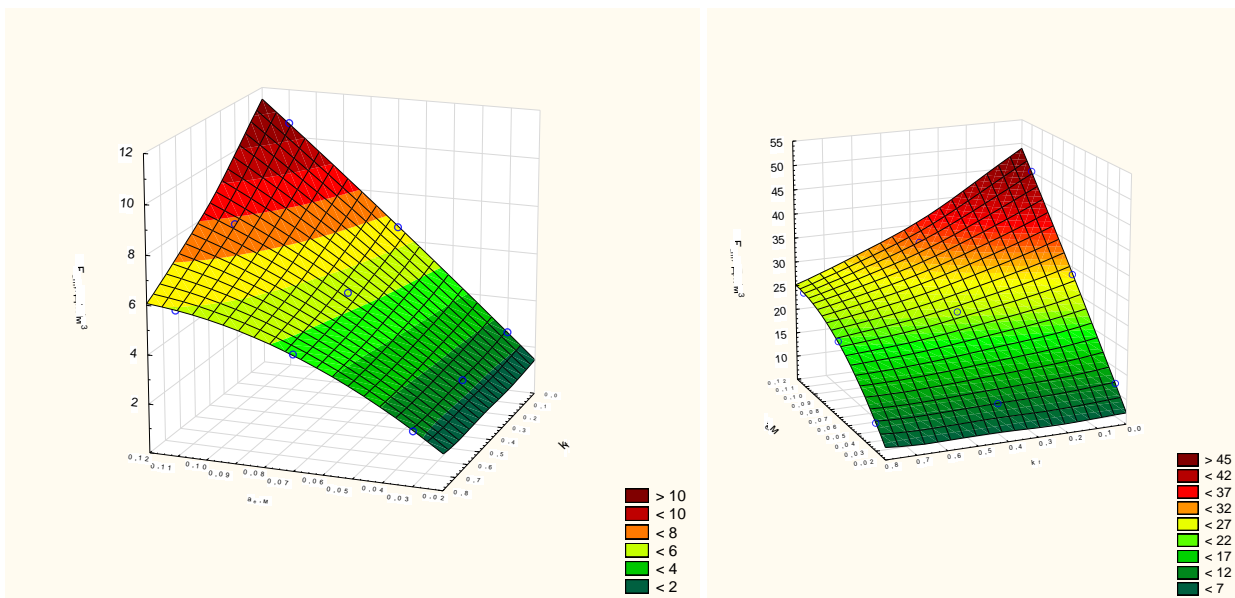
Название					I_p		$d_2, \%$	I_L	$\rho, \text{м/м}^3$	
Суглинок					0,1536		30	0,6	2,03...2,07	
y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	R	k_{ha}
E_{dmu}	4,7412	-2,333	-780,262	-12,0679	426,379	5,373	-4148,32	2128,266	1,0	0,25
$E_{dmэ}$	53,097	-26,084	-2160,53	-302,550	1114,588	145,841	137,005	116,270	1,0	1,0
$E_{dm\phi}$	-205,768	100,395	4086,641	2789,567	-1817,00	-1369,51	-113515	56526,2	1,0	1,75
y				a_0	b_0	b_1	b_2	b_3	R	R^2
k_{f04}				-4,9039	1,7248	0,0212	-0,4931	0,0692	0,999	99,92
k_{f08}				-22,2882	3,1267	0,0089	-0,2101	0,0296	0,99	99,915

Таблица 5 – Параметры регрессионной модели локальной энергоемкости разрушения глинистых грунтов с КВ

Название					I_p		$d_2, \%$	I_L	$\rho, \text{м/м}^3$	
Глина					0,209		73	0,1	2,26...2,28	
y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	R	k_{ha}
E_{dmu}	-51,586	22,992	-2581,9	802,4377	1233,911	-358,15	-49399,8	22080,43	1,0	0,25
$E_{dm\vartheta}$	5,322	-2,639	-5086,63	404,604	2378,479	-183,505	-52468,1	23556,83	1,0	1,0
$E_{dm\vartheta\delta}$	85,02162	-40,491	-22515,6	1035,377	10461,83	-438,932	-185938	83140,56	1,0	1,75
y				a_0	b_0	b_1	b_2	b_3	R	R^2
k_{f04}				-13,7225	2,6386	0,0214	-0,1848	0,0237	0,999	99,882
k_{f08}				-22,5379	3,107447	0,021604	-0,188657	0,024051	0,999	99,875

Таблица 6 – Параметры регрессионной модели локальной энергоемкости разрушения глинистых грунтов с КВ

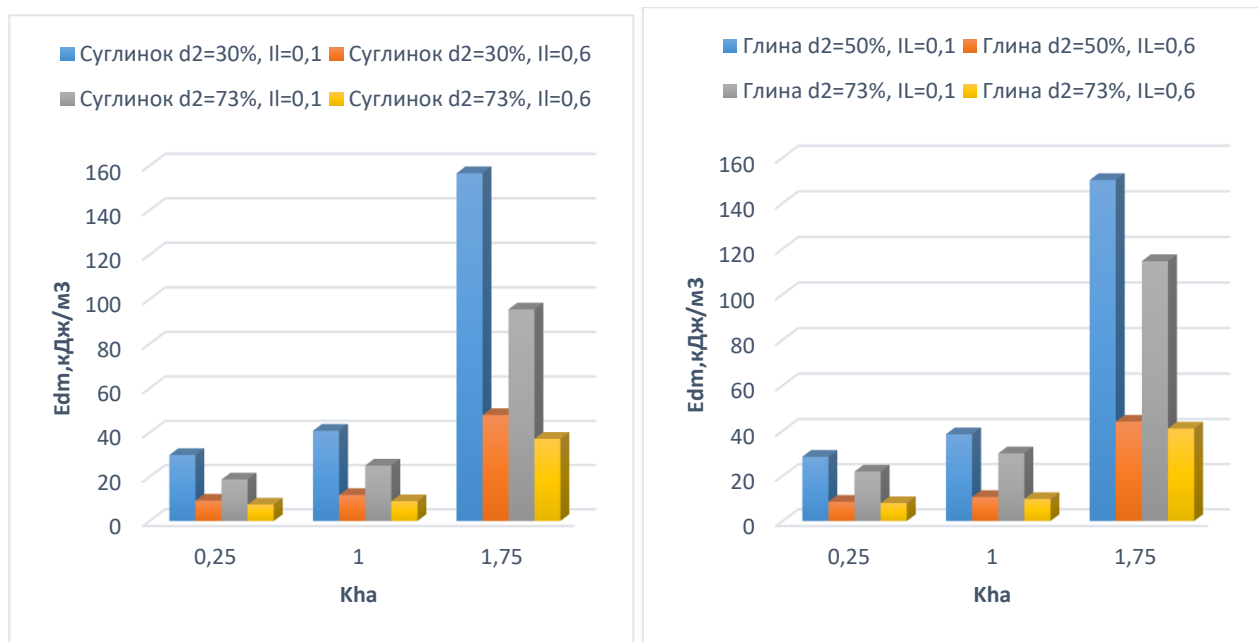
Название					I_p		$d_2, \%$	I_L	$\rho, \text{м/м}^3$	
Глина					0,209		73	0,6	2,24...2,26	
y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	R	k_{ha}
E_{dmu}	39,714	-17,806	1965,44	-177,11	913,942	77,631	-6520,74	2993,65	1,0	0,25
$E_{dm\vartheta}$	1,714	-0,858	-1638,66	130,381	773,4630	-59,674	-16909,0	7660,498	1,0	1,0
$E_{dm\vartheta\delta}$	30,136	-14,490	-7982,66	367,383	3743,912	-157,078	-65945,6	29753,02	1,0	1,75
y				a_0	b_0	b_1	b_2	b_3	R	R^2
k_{f04}				-11,2757	2,4471	0,0257	-0,2221	0,0285	0,999	99,881
k_{f08}				-23,1564	3,1351	0,0210	-0,18378	0,0234	0,999	99,875



а)

б)

Рисунок 12 - Зависимость локальной энергоёмкости разрушения от формы и размера КВ: а) суглинок, консистенция заполнителя – 0,6; б) глина, консистенция заполнителя – 0,1



а)

б)

Рисунок 13 - Динамика локальной энергоёмкости разрушения в зависимости от глубины залегания КВ относительно режущей кромки: а) суглинок; б) глина

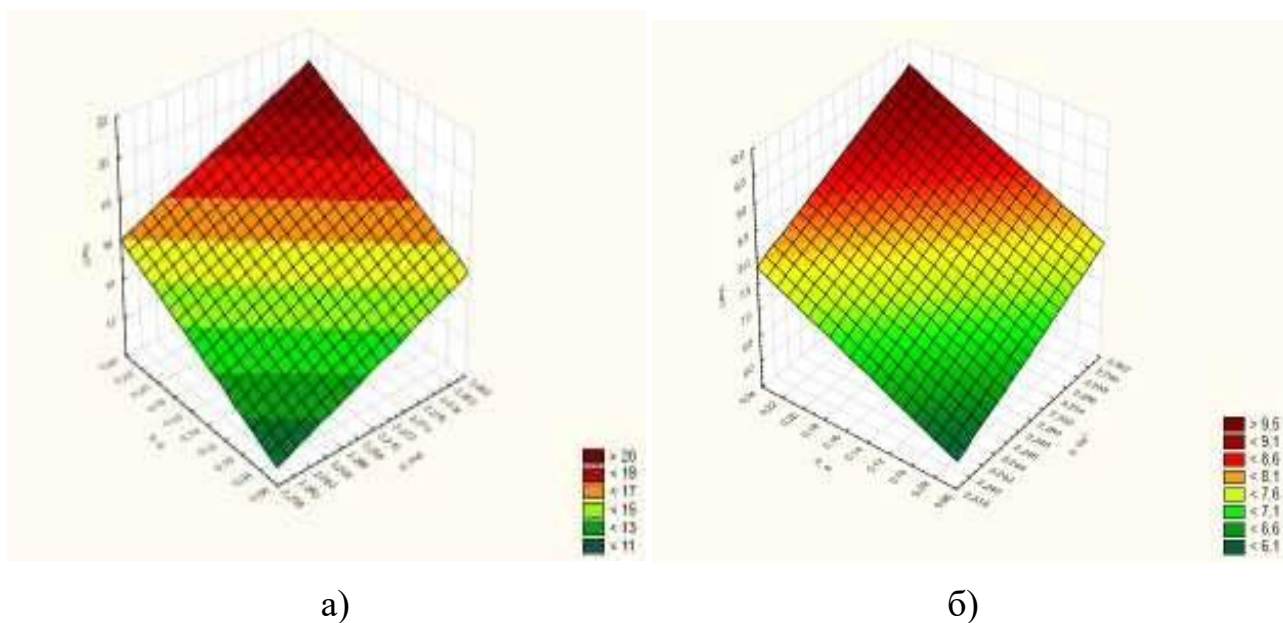


Рисунок 14 - Динамика локальной энергоёмкости разрушения в зависимости от плотности и ширины резания грунта: а) супесь, консистенция заполнителя – 0,1; б) глина, консистенция заполнителя – 0,6

Для повышения эффективности ЗМ, для снижения локальной энергоёмкости разрушения грунта с КВ необходимо усовершенствования конструкции режущего инструмента рабочего органа с целью: снижения энергии выталкивания КВ на дневную поверхность грунта, длины резания грунта, требуется увеличения рабочей длины режущего инструмента (переход из экстенсивного разрушения грунта в интенсивное); снижения энергии вдавливания КВ в массив грунта, требуется гибкость рабочей поверхности режущего инструмента (КВ внедряется на небольшую глубину в массив грунта).

В шестой главе **«Практические рекомендации, направленные на повышение эффективности разработки грунтов с каменистыми включениями землеройными машинами»** разработаны технические решения, повышающие эффективность разработки грунтов с КВ ЗМ и мероприятия, направленные на практическое использование результатов теоретических и экспериментальных исследований.

С целью снижения динамических нагрузок, действующих в плоскости козырька ковша от боковой силы резания на элементы рабочего оборудования, рабочего органа разработаны проекты ковша экскаватора, которые защищены патентами КР на изобретения. При попадании в межзубовое пространство КВ боковые нагрузки на соответствующие зубья возрастают и при превышении ими сил упругости пружин этих зубьев, они поворачиваются вокруг своих пальцев. После обхода ковшом экскаватора КВ зубья, претерпевшие повороты, под воздействием разжимающихся пружин, возвращаются в первоначальные положения, и разработка грунта продолжается.

С целью изменения координаты действия внешней силы, для снижения

значение энергии резания грунта разработан проект ковша экскаватора, который защищен патентом на изобретение КР. Для адаптации к условиям разрушения грунта с КВ предлагается ковш экскаватора с зубьями с упругими элементами, который также защищен патентом КР на изобретение. Режущие инструменты (зубья), имеют возможность отклонения относительно плоскости козырька ковша и изменения угла режущей кромки зуба, независимо друг от друга. При наступлении зуба на КВ, его режущая кромка может отклоняться, что направляет его по криволинейной поверхности камня, совершая обводящее движение по нему, т.е. совершается адаптированное движение зуба. Такое адаптированное движение позволяет изменять направление действия зуба при попадании на КВ, отклоняясь от действия в упор, при этом КВ внедряется на небольшую глубину, снижается энергия резания грунта ковшом ЗМ.

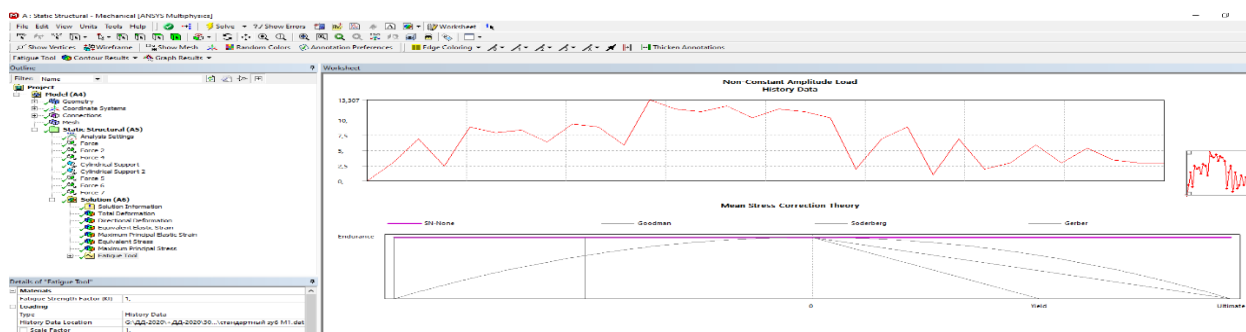
Для повышения эффективности разработки грунтов, упрощения конструкции, увеличения надежности и долговечности разработана конструкция ковша со специальными зубьями, которая защищена патентом КР на полезную модель. Зубья, рабочая поверхность которых имеет эллипсоидную форму очертания, с учетом наиболее представительной формы КВ, позволяющая изменить точки касательных силовых линий к поверхности КВ, способствующая снижению продольного размера ядра уплотненного грунта и энергоемкости разработки грунта с КВ, а увеличение длины зубьев на 20...25 % с учетом наиболее представительного размера КВ, позволяет снизить точки приложения зубьев на КВ, при этом они интенсивно выкатываются на поверхность грунта, происходит снижение локальной энергоемкости разрушения грунта, содержащего различные КВ.

Для прогнозирования грунтовых условий эксплуатации дорожно-транспортных, сельскохозяйственных машин, для компьютерного моделирования взаимодействия рабочего органа машин с грунтом, содержащих КВ разработан прибор для определения содержания камней в грунте и получен патент КР на изобретение.

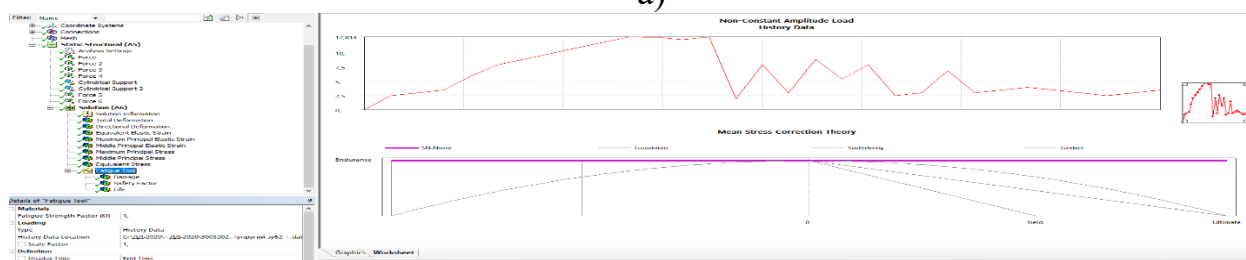
Для практического применения результатов исследований, метод расчета силы сопротивления резанию грунта с КВ автоматизирован в программе *Microsoft Visual Basic*. Предельная нагрузка пассивного давления грунта прикладывается к элементарным поверхностям режущего инструмента и КВ. При отсутствии КВ рассчитывается сила сопротивления резанию однородного (заполнителя) грунта (P_{rh}). Рассчитываются объемы разрушенного грунта в центральной (V_c) и боковой частях (V_s) прорези разрушения, с целью установления коэффициента пространственности (η_{sp}). Проекция на касательную траектории резания элементарной равнодействующей силы сопротивления (dP_{dmi}) суммируются по элементарным шаровым поясам и областям их нахождения (P_{dm}). Таким образом рассчитанная общая сила сопротивления резанию применяется в методике расчета локальной энергоемкости разрушения грунтов с различными КВ.

Усталостная долговечность определена на основе воздействия на локальные участки металлоконструкции рабочего органа ЗМ реальной истории нагружения. Конструкция упругого зуба ковша изменяет историю нагружения,

снижает динамичность нагрузок, действующих на локальные участки рабочего органа (рисунок 15, б).



а)

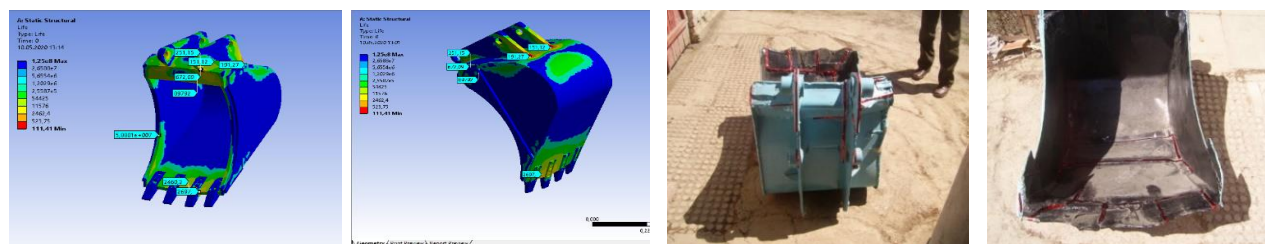


б)

Рисунок 15 - Изменение силы сопротивления резанию при внедрении КВ в массив грунта: а) – разработка грунта со стандартным зубом; б) – разработка грунта с упругим зубом

Созданная в программном комплексе *SolidWorks* 3D модель ковша экскаватора ЭО-2621А обрабатывается в системе *Ansys Workbench* с целью расчета усталостной долговечности локальных участков металлоконструкции ковша.

Результаты расчета усталостной долговечности и повреждения, разрушения, наблюдаемые в ковше в производственных условиях эксплуатации, дают качественно схожие картины (рисунок 16).



а)

б)

Рисунок 16 – а) - результаты расчета; б) - повреждения и разрушения, наблюдаемые в ковше в производственных условиях эксплуатации: красные линии – зоны повреждения

Разработана методика расчета технической производительности одноковшового экскаватора, разрабатывающего грунты с КВ. В зависимости от прочности грунта, параметров его резания и КВ, а также видов разрушения грунта изменяется локальная энергия разрушения и продолжительность копания грунта с КВ рабочим органом экскаватора (43):

$$T_{\kappa_i} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} \mathcal{E}_{dm_i} n_{dm_i}}{N \eta_{mp} \xi}, \quad (43)$$

где \mathcal{E}_{dm_i} – энергия i -того вида разрушения, n_{dm_i} – количество i -того вида разрушения, N – мощность двигателя базовой машины, η_{mp} – КПД привода, ξ – коэффициент использования мощности двигателя при копании грунта.

Техническую производительность экскаватора можно определить зависимостью (44):

$$\Pi = \frac{3600 \frac{q k_{nan}}{k_{раз}}}{\frac{\sum_{i=1}^{i=3} \mathcal{E}_{dm_i} n_{dm_i}}{N \eta_{mp} \xi} + T_{нв} + T_{в} + T_{нз}}, \quad (44)$$

где q – вместимость ковша, k_{nan} , $k_{раз}$ – коэффициенты наполнения ковша и разрыхления грунта, соответственно, \mathcal{E}_{dm_i} – энергия i -того вида разрушения, n_{dm_i} – количество i -того вида разрушения, N – мощность двигателя машины, η_{mp} – КПД привода, ξ – коэффициент использования мощности двигателя, $T_{нв}$ – продолжительность поворота рабочего оборудования на выгрузку, $T_{в}$ – продолжительность выгрузки, $T_{нз}$ – продолжительность поворота обратно в забой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Вероятности появления связных дисперсных грунтов, содержащих каменные включения по территории Кыргызской Республики, составляет 0,19...0,31, которые являются достаточно сложными для разработки, а установленные вероятностный диапазон изменения физико-механических свойств, классификация каменных включений позволяют формировать стохастическую модель нагрузки землеройных машин.

2. Впервые разработаны математические модели, прогнозирующие силы сопротивления резанию однородного грунта, и связного дисперсного грунта содержащего шаровидное/эллипсоидное каменное включение, учитывающие

параметры грунта, его резания и КВ с применением предельной нагрузки пассивного давления грунта. Составлены математические модели локальной энергии, энергоёмкости и прорези разрушения грунтов с каменистыми включениями с использованием впервые введенного параметра «длины резания» грунта.

3. Созданы математические регрессионные модели локальной энергоёмкости разрушения, прогнозирующие удельные энергетические затраты разрушения связных дисперсных грунтов, содержащих различные каменистые включения, в соответствии с параметрами грунта, резания и КВ.

4. Приближенное физическое моделирование реализуется на основе 15 критериев подобия физико-механических свойств, структуры, гранулометрического состава грунта, линейных размеров, которые обеспечивают подобность процессов резания связного дисперсного грунта с каменистым включением рабочим органом землеройной машины в производственных и лабораторных условиях.

5. Установлены 3 вида разрушения грунта: разрушение с интенсивным выводом камня на поверхность грунта ($k_{ha} = 0...0,25$); разрушение с экстенсивным выводом камня на поверхность грунта ($k_{ha} = 0,25...1,75$); и разрушение с вдавливанием камня в массив грунта ($k_{ha} = 1,75...2,0$). Локальная энергоёмкость разрушения грунтов повышается с возрастанием плотности грунта на 20...32 %, с ростом ширины резания на 22...34 %, с ростом размера каменистого включения на 280...333 %, с возрастанием глубины залегания камня относительно режущей кромки на 23...38 %, при экстенсивном разрушении грунта, свыше 400 % при разрушении грунта с вдавливанием камня, а увеличение консистенции заполнителя (переход из полутвердого в мягко пластичное состояние) снижает локальную энергоёмкость грунта на 10...25 %, рост содержания минеральных частиц крупнее 2 мм от 30 % к 73 % уменьшает локальную энергоёмкость грунта на 5...20 %.

6. Разработана методика оценки усталостной долговечности, позволяющая прогнозировать сопротивление усталости локальных участков металлоконструкции рабочего органа экскаватора с применением реальной истории нагружения.

7. Создана методика расчета технической производительности одноковшового экскаватора, основанная на продолжительности копания, зависящей от локальной энергии разрушения грунтов с каменистыми включениями.

8. Прошли полевые испытания опытные образцы ковша со специальными зубьями экскаватора, снижающие продолжительность копания грунтов с каменистыми включениями на 15...20 %, повышающие техническую производительность экскаватора на 7,4...12,4 %, и с упругими зубьями, повышающие усталостную долговечность локальных участков металлоконструкции ковша экскаватора на 5...15 %.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пат. 900 С1 КР, E02F 9/28 (2006.1). Ковш экскаватора [Текст] / М. С. Тургунбаев, К. Т. Шамуратов; Бишкек. - № 20050091.1; заявл. 22.08.2005; опубл. 31.10.2006, Бюл. № 10. - 6 с.: ил.
2. Тургумбаев, Ж. Ж. Грунтовые условия эксплуатации землеройной техники на территории Кыргызской Республики [Текст]: монография / Ж. Ж. Тургумбаев, **М. С. Тургунбаев**. - Бишкек: Бишкектранзит, 2008. - 80 с.
3. **Тургунбаев, М. С.** Исследование крупнообломочных включений грунтов [Текст] / М. С. Тургунбаев // Известия КГТУ им. Раззакова. - Бишкек, 2009. - № 16. - С. 122-126.
4. Тургумбаев, Ж. Ж. Пылеватые и глинистые грунты с крупнообломочными включениями [Текст] / Ж. Ж. Тургумбаев, **М. С. Тургунбаев** // Известия КГТУ им. Раззакова. - Бишкек, 2009. - № 16. - С. 151-154.
5. Пат. 1133 С1 КР, E02F 9/28 (2006.1). Ковш экскаватора [Текст] / М. С. Тургунбаев, К. Т. Шамуратов; Бишкек. - № 20070139.1; заявл. 05.11.2007; опубл. 31.01.2009, Бюл. № 1. - 5 с.: ил.
6. **Тургунбаев, М. С.** Грунты, содержащие крупные обломки [Текст] / М. С. Тургунбаев. // Наука и ее роль в современном мире. - Караганды: Болашак-Баспа, 2010. - Том 4. - С. 17-21.
7. Пат. 113 КР, G01N 3/00 (2010.01), G01N 3/58 (2010.01), G01M 7/00 (2010.01). Стенд для исследования процесса резания грунта [Текст] / М. С. Тургунбаев, К. Т. Шамуратов; Бишкек. - № 20100014.2; заявл. 27.04.2009; опубл. 30.09.2010, Бюл. № 9. - 4 с.: ил.
8. Тургумбаев, Ж. Ж. Определение закономерностей распределения каменных включений в грунте [Текст] / Ж. Ж. Тургумбаев, **М. С. Тургунбаев** // Известия КГТУ им. Раззакова. - Бишкек, 2011. - № 22. - С. 7-10.
9. Пат. 1454 С1 КР, E02F 9/28 (2011.1). Ковш экскаватора [Текст] / М. С. Тургунбаев; Бишкек. - № 20100108.1; заявл. 14.10.2010; опубл. 31.05.2012, Бюл. № 5. - 5 с.: ил.
10. **Тургунбаев, М. С.** Особенности разрушения пород, содержащих каменные включения / М. С. Тургунбаев // Горное оборудование и электромеханика. - Москва, 2014. - № 11(108). - С. 34-40. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22537429>.
11. Пат. 1662 С1 КР, E02F 3/00 (2014.01) E02F 9/00 (2014.01). Ковш экскаватора с адаптируемыми зубьями [Текст] / М. С. Тургунбаев, И. А. Абдрахманов, А. К. Темиралиев; Бишкек. - № 20140004.1; заявл. 23.01.2014; опубл. 29.08.2014, Бюл. № 8. - 9 с.: ил.
12. Пат. 1679 С1 КР, E02F 3/00 (2014.01) E02F 9/00 (2014.01). Ковш экскаватора с упругими зубьями [Текст] / М. С. Тургунбаев, Р. А. Мендекеев, И. А. Абдрахманов, А. К. Темиралиев; Бишкек. - № 20140033.1; заявл. 17.03.2014; опубл. 30.09.2014, Бюл. № 9. - 6 с.: ил.

13. **Тургунбаев, М. С.** Снижение энергоемкости процесса разрушения породы с каменистым включением упругим режущим органом ковша [Текст] / М. С. Тургунбаев // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2014. - № 32 (часть II). – С. 217-221.

14. Мендекеев, Р. А. К определению силы сопротивления разрушению породы, содержащей каменистое включение, рабочим органом землеройной машины [Текст] / Р. А. Мендекеев, **М. С. Тургунбаев** // Механизация строительства. – Москва, 2015. - № 8. - С. 24-26. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23925721>

15. Пат. 1456 С1 КР, G01B 5/02 (2011.01). Прибор для определения содержания камней в грунте [Текст] / М. С. Тургунбаев; Бишкек. - № 20100109.1; заявл. 14.10.2010; опубл. 31.05.2015, Бюл. № 5. - 4 с.: ил.

16. Мендекеев, Р. А. Классификационные признаки крупных обломочных включений грунтов [Текст] / Р. А. Мендекеев, **М. С. Тургунбаев** // Вестник КГУСТА. – Бишкек, 2016. - № 2 (52). - С. 100-104.

17. **Тургунбаев, М. С.** Критерии подобия процесса разрушения грунта, содержащего обломочно-каменное включение [Текст] / М. С. Тургунбаев // Известия ВУЗов Кыргызстана. - Бишкек, 2016. - № 11. - С. 48-52.

18. **Тургунбаев, М.С.** Методика расчета усталостной долговечности ковша экскаватора в среде Ansys 15.0 [Текст] / М. С.Тургунбаев // [Машиноведение](#). – Бишкек, 2016. - [№ 1\(3\)](#). - С. 72-81. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27175411>.

19. **Тургунбаев, М. С.** Техническая производительность экскаватора при разработке грунтов с обломочными включениями [Текст] / М. С. Тургунбаев // Известия ВУЗов Кыргызстана. – Бишкек, 2016. - № 11. - С. 53-55.

20. **Тургунбаев, М. С.** К вопросу особенности разрушения грунта, содержащего обломочно-каменные включения рабочим органом землеройной машины [Текст] / М.С. Тургунбаев // Наукоеведение: научный электронный журнал. – Москва, 2017. - том 9, № 3. - URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/98TVN317.pdf>.

21. Мендекеев, Р. А. Энергоемкость разрушения однородного грунта рабочим органом землеройной машины [Текст] / Р. А. Мендекеев., **М. С. Тургунбаев** // Механизация строительства. – Москва, 2017. - № 1. - С. 45-48. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27648489>.

22. **Тургунбаев, М. С.** К вопросу закона распределения минеральных частиц грунта [Текст] / М. С.Тургунбаев // Высокие технологии в строительном комплексе. – Воронеж, 2020. - № 1. - С. 134-141. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42992561>.

23. **Тургунбаев, М. С.** Оценка сопротивления усталости локальных участков конструкции ковша экскаватора ЭО-2621 с использованием конечно-элементного анализа [Текст] / М. С.Тургунбаев // Высокие технологии в строительном комплексе. – Воронеж, 2020. - № 1. - С. 141-151. - URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42992562>.

24. Turgumbayev J. J. Predicting the resistance force of homogeneous ground to cutting [Text] / J. J. Turgumbayev, **M. S. Turgunbayev** // News of the National

Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2021. – Volume 4, Number 448. P. 91-98.
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=57431490600&zone=>. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.86>.

25. Turgumbayev J. J. Prediction of the cutting resistance force of the soil containing stony fractions [Text] / J. J. Turgumbayev, **M. S. Turgunbayev** // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. – 2021. – Volume 5, Number 449. P. 161-169.
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=57431490600&zone=>. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.110>.

26. Тургумбаев, Ж. Ж. Модель прогнозирования силу сопротивления резанию грунта, содержащего различные каменные включения [Текст] / Ж. Ж. Тургумбаев, **М. С. Тургунбаев** // Высокие технологии в строительном комплексе. – Воронеж, 2021. – № 2. – С. 130-138. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47403693>.

27. Тургумбаев, Ж. Ж. Геометрические параметры прорези разрушенного грунта с каменным включением по результатам резания грунта узким режущим элементом землеройной машины [Текст] / Ж. Ж. Тургумбаев, **М. С. Тургунбаев** // Вестник КГУСТА. – Бишкек, 2022. – № 3 (77). – С. 1233-1242. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49803705>.

28. **Тургунбаев, М. С.** Влияние эксцентричного расположения центра тяжести каменного включения на объем разрушенного грунта [Текст] / М. С. Тургунбаев, З. Б. Тургунбаева, М. Н. Осмонов // Известия ВУЗов Кыргызстана. – Бишкек, 2022. – № 5. – С.32-36. EDN: [WVRLLF](https://www.wvrlf.com)

29. Пат. 342 КР, E02F 3/40 (2022.01) E02F 9/28 (2022.01). Экскаваторный ковш [Текст] / Ж. Ж. Тургумбаев, М. С. Тургунбаев, Т. М. Мелисбеков; Бишкек. – № 20220010.2; заявл. 24.12.2021; опубл. 30.08.2022, Бюл. № 8. – 5 с.: ил.

30. **Тургунбаев, М. С.** Длина резания дисперсного грунта с каменным включением режущим инструментом землеройной машины [Текст] / М. С. Тургунбаев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек, 2023. – № 4. – С. 17-23. DOI: [10.26104/NNTIK.2023.61.91.004](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.61.91.004)

31. **Тургунбаев, М. С.** Моделирование структуры дисперсного грунта с каменным включением [Текст] / М. С. Тургунбаев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек, 2023. – № 4 – С. 23-29. DOI: [10.26104/NNTIK.2023.68.68.005](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.68.68.005)

32. **Тургунбаев, М. С.** Структурный эффект дисперсного грунта с каменными включениями [Текст] / М. С. Тургунбаев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек, 2023. – № 5. – С. 32-37. DOI: [10.26104/NNTIK.2023.55.73.007](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.55.73.007)

33. **Тургунбаев, М.С.** Статистический анализ результатов резания дисперсного грунта с каменным включением режущим инструментом землеройной машины [Текст] / М. С. Тургунбаев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек, 2023 – № 5. – С. 27-32. DOI: [10.26104/NNTIK.2023.68.15.006](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.68.15.006)

34. **Тургунбаев, М. С.** Математические регрессионные модели составляющих локальной энергоемкости разрушения суглинка, содержащего каменистое включение. [Текст] / М. С. Тургунбаев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – Бишкек, 2023. - № 9. – С. 19-22.
DOI: [10.26104/NNTIK.2023.63.59.004](https://doi.org/10.26104/NNTIK.2023.63.59.004)

Тургунбаев Мелисбек Сыргабаевичтин 05.05.04 – жол, курулуш жана көтөрүп-ташуучу машиналар адистиги боюнча техникалык илимдердин доктору окумуштуулук даражасын изденип алуу үчүн «Таштарды камтыган топурактарды жер казуучу машиналардын жумушчу органдары менен кесүү теориясынын илимий негиздери» темасына жазылган диссертациясынын
КЫСКАЧА МАЗМУНУ

Негизги сөздөр: байланышкан дисперстүү топурак, таш кошундусу, кесүү теориясы, жер казуучу машина, жумушчу орган, топурактын кесүүгө каршылык күчү, талкалануунун жергиликтүү энергия сыйымдуулугу, математикалык регрессиялык моделдер, иштетүүнүн натыйжалуулугу.

Изилдөө объектиси: жер казуучу машиналардын жумушчу органдары менен таштарды камтыган топурактарды кесүү.

Изилдөө предмети: жер казуучу машиналардын жумушчу органдары менен таштарды камтыган топурактарды кесүү теориясы жана анын талкалануу мыйзам ченемдүүлүктөрү.

Иштин максаты: теориялык жана эксперименталдык изилдөөлөрдү жүргүзүү, таштарды камтыган топурактардын талкалануу процессинин мыйзам ченемдүүлүктөрүн аныктоо аркылуу жер казуучу машиналардын жумушчу органдары менен таштарды камтыган топурактарды кесүү теориясынын илимий негиздерин иштеп чыгуу.

Изилдөө методдору жана аппаратура: системалык анализ, математикалык статистика жана ыктымалдуулук теориясынын, математикалык моделдөөнүн ыкмалары, системалаштыруу, классификация, бир жана көп факторлуу эксперименттер, статистикалык моделдөө.

Эксперименталдык изилдөөлөр заманбап ченөөчү аппараттардын жана приборлордун комплексин колдонуу менен жүргүзүлдү.

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы: Таш кошундунун бети элементардык алкактарга бөлүнүшү, аларга топурактын пассивдүү басымынын чектүү жүктөмүнүн жүктөлүшү жана элементардык күчтөрдүн вектордук суммасы топурактын кесүүгө каршылык жалпы күчүн бериши менен айырмаланган формула сунушталды. Биринчи жолу колдонулуп жаткан топурак «кесүү узундугу» параметрин негизинде математикалык регрессиялык моделдер аныкталган, алар таш кошундулуу топурактын талкалануусунун локалдык энергия сыйымдуулугун болжолдойт. Ыңгайлуу жана атайын тиштери бар чөмүч иштелип чыккан, алар ташты жер бетине интенсивдүү түрдө чыгарышы, ташты ныгырууда, анын үстүн жанып өтүшү менен айырмаланат.

Пайдалануу даражасы: иштин жыйынтыгы КР ТЖК министрлигине караштуу "Автожол" МИ Таластагы филиалы, №47 ЖЭИ, Талас шаарынын коммуналдык кызматтарды көрсөтүү боюнча МИ жана И. Раззаков атындагы КМТУнун окуу процессине кабыл алынды.

Колдонуу чөйрөсү. Таш кошундулуу топурактарды казуу, таш кошундулуу топурактарды иштетүүдө техникалык чечимдерди жана технологияларды комплекстүү баалоо, жер казуучу машиналар менен таш кошундулуу топурактарды казууну автоматташтыруу.

РЕЗЮМЕ

диссертации Тургунбаева Мелисбека Сыргабаевича на тему: «Научные основы теории резания грунтов с каменистыми включениями рабочими органами землеройных машин» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.04 – дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

Ключевые слова: связный дисперсный грунт, каменистое включение, теория резания, землеройная машина, рабочий орган, сила сопротивления грунта резанию, локальная энергоемкость разрушения, математические регрессионные модели, эффективность разработки.

Объект исследования: резание грунтов с каменистыми включениями рабочими органами землеройных машин.

Предмет исследования: теория резания и закономерности разрушения грунтов с каменистыми включениями рабочими органами землеройных машин.

Цель работы: разработка научных основ теории резания грунтов с каменистыми включениями рабочими органами землеройных машин путем проведения теоретических и экспериментальных исследований, установления закономерностей процесса разрушения грунтов с каменистыми включениями.

Методы исследования и аппаратура: методы системного подхода, системного анализа, математической статистики и теории вероятностей, математического моделирования, систематизация, классификация, одно и многофакторный эксперименты, статистическое моделирование.

Экспериментальные исследования проводились с использованием комплекса современных измерительных аппаратур и приборов.

Полученные результаты и их новизна: Предложена формула, отличающаяся тем, что поверхность каменистого включения разбиваются на элементарные пояса, на которые действуют отпор грунта, векторная сумма которых, формирует общую силу сопротивления грунта резанию. Предложены математические регрессионные модели, отличающиеся тем, что прогнозируют локальную энергоемкость разрушения грунтов с каменистыми включениями, на основе впервые введенного и используемого параметра «длины резания» грунта. Разработаны конструкции ковшей с адаптируемыми и специальными зубьями, отличающиеся тем, что при разрушении грунта, каменистое включение интенсивно выводится на дневную поверхность и поверхность камня обходится при вдавливании его в массив грунта, приводящие к снижению локальной энергоемкости разрушения грунтов.

Степень использования: результаты работы приняты к внедрению Таласским филиалом ГП «Автожол» и ДЭП №47 при МТи К КР, муниципальным предприятием по оказанию коммунальных услуг г. Талас. Результаты исследований используются в учебном процессе КГТУ им. И. Раззакова.

Область применения. Разработка грунтов с каменистыми включениями, комплексная оценка совершенства технических решений и технологии, автоматизация разработки грунтов с каменистыми включениями землеройными машинами.

SUMMARY

of Turgunbaev Melisbek Syrgabaevich dissertation on the topic: «Scientific foundations of the theory of cutting soils with stony inclusions by working bodies of earthmoving machines» for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.05.04 – road, construction and lifting and transport machines

Keywords: cohesive dispersed soil, rocky inclusion, cutting theory, earthmoving machine, working body, strength of soil resistance to cutting, local energy intensity of destruction, mathematical regression models, development efficiency.

The object of the study: cutting of soils with rocky inclusions by working bodies of earthmoving machines.

Subject of research: the theory of cutting and the patterns of destruction of soils with rocky inclusions by the working bodies of earthmoving machines.

The purpose of the work: to develop the scientific foundations of the theory of cutting soils with stony inclusions by working bodies of earthmoving machines, by conducting theoretical and experimental studies, establishing patterns of the process of destruction of soils with stony inclusions. The destruction of a cohesive dispersed soil by the working body of an earthmoving machine.

Research methods and equipment: Methods of a systematic approach, system analysis, mathematical statistics and probability theory, mathematical modeling, systematization, classification, single and multifactorial experiments were used. Experimental studies were carried out using a complex of modern measuring instruments and instruments.

The results obtained and their novelty: A formula has been proposed, characterized in that the surface of a rocky inclusion is divided into elementary spherical belts, which are subject to soil resistance, the vector sum of which forms the total force of soil cutting resistance. Mathematical regression models are proposed, which differ in that they predict the local energy intensity of destruction of soils with rocky inclusions, based on the first introduced and used parameter - the length of soil cutting. Designs of buckets with adaptable and special teeth have been developed, characterized in that when the soil is destroyed, the rocky inclusion is intensively brought to the surface and the surface of the stone is bypassed when it is pressed into the soil mass, leading to a decrease in the local energy intensity of soil destruction.

Degree of use: the results of the work were accepted for implementation by the Talas branch of the State Enterprise «Автожол» under the Ministry of Transport and Communications of the Kyrgyz Republic, road maintenance enterprise 47, municipal utility company Talas. The research results are used in the educational process of I. Razzakov KSTU in the training of specialists in the field of «Ground transport and technological machines and complexes».

The scope of application: Development of soils with rocky inclusions, comprehensive assessment of the perfection of technical solutions and technology, automation of the development of soils with rocky inclusions by earthmoving machines.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем автореферате диссертации приняты следующие сокращения и обозначения:

- ФЕЕ – фундаментальное уравнение землеройной работы;
- Грунт – связный дисперсный грунт;
- ДЭП – дорожно-эксплуатационное предприятие;
- ЗМ – землеройная машина;
- ЗР – закон распределения;
- КВ – каменистое включение;
- КР – Кыргызская Республика;
- МНПК - международная научно-практическая конференция;
- НДС – напряженно-деформированное состояние;
- ПНС – предельное напряженное состояние;
- ПФЭ – полно факторный эксперимент.

Тургунбаев Мелисбек Сыргабаевич

**Научные основы теории резания грунтов с каменистыми
включениями рабочими органами землеройных машин**

05.05.04 – дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Редактор: А.Б. Аманкулова

Подписано в печать 05.02.2025 г.

Формат 60х84 1/16. Объем 2,5 уч.-изд.л.

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Тираж 100 экз. Заказ 136

720020, г. Бишкек, ул. Малдыбаева, 34, б
Кыргызский государственный технический университет
им. И. Раззакова