

На правах рукописи



КУЗНЕЦОВ Илья Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО ФРЕЗЕРНОГО
РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА**

Специальность 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

Научный руководитель: **Савельев Сергей Валерьевич**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», профессор кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» (г. Омск).

Официальные оппоненты: **Жулай Владимир Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», заведующий кафедрой строительной техники и инженерной механики им. профессора Н.А. Ульянова (г. Воронеж).

Овсянников Виктор Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», профессор кафедры «Технология машиностроения» (г. Тюмень).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита диссертации состоится «24» января 2024 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета ВАК РФ 99.2.109.02 при ФГАОУ ВО «ОмГТУ» и ФГБОУ ВО «СибАДИ» по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, аудитория 2.318. Тел. (3812) 65–03–23, e-mail: iateterina@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistratury-i-aspirantury/studies/dissertations/67047/>;

в библиотеке ФГАОУ ВО «ОмГТУ» и на сайте университета по адресу: https://omgtu.ru/scientific_activities/dissertatsionnye_sovety/obyavleniya_o_zashchite_disse_rtsiy_i_dokumenty_k_nim/kuznetsov-i-s/.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5. Тел. (3812) 65–03–23, e-mail: iateterina@mail.ru.

Автореферат разослан «20» ноября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук



Тетерина
Ирина Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Система трубопроводов на территории Российской Федерации имеет протяженность сотни тысяч километров. При этом подавляющее большинство трубопроводов прокладывается подземным способом. Энергоносители и другие ресурсы могут доставляться при помощи существующей трубопроводной сети, что особенно актуально для отдаленных и труднодоступных районов.

Как показывает опыт эксплуатации, при увеличении срока службы подземных трубопроводов свыше 15 - 20 лет резко возрастает интенсивность потока отказов и возникновения аварийных ситуаций. Согласно «Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года», необходимо обеспечить доступность и качество магистральной транспортной инфраструктуры. Создание высокоэффективных средств механизации технологических процессов ремонта трубопровода позволит решить данную задачу.

Основной машиной, применяемой при ремонте трубопровода, является гидравлический экскаватор, который обеспечивает до 50% выполнения земляных работ. Порядок проведения ремонтных работ предусматривает выполнение трудоемких и дорогостоящих операций, к числу которых относится разработка грунта вокруг трубопровода. Использование шанцевого инструмента и ручных молотов или гидромолотов, установленных на экскаваторе, приводит к значительному увеличению трудоемкости и себестоимости земляных работ, является небезопасным для их выполнения и приводит к снижению производительности передвижных механизированных колонн.

В связи с этим, актуальной и своевременной является научная задача, направленная на создание сменного рабочего оборудования экскаватора, позволяющего обеспечить полную механизацию работ по разработке и выносу грунта из-под трубопровода, повышение эффективности и безопасности выполнения технологических операций при проведении земляных работ.

Степень разработанности темы исследования.

Среди ученых, внесших существенный вклад в решение научных задач и проблем по разработке грунтов и совершенствованию землеройных и землеройно-транспортных машин, стоит отметить Артемьева К.А., Баловнева В.И., Ветрова Ю.А., Горячкина В.П., Демиденко А.И., Домбровского Н.Г., Завьялова А.М., Зеленина А.Н., Керова И.П., Недорезова И.А., Фёдорова Д.И. и других.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.11 – «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы», пункты 5, 7.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности разработки грунта под подземным трубопроводом экскаватором с телескопическим фрезерным рабочим оборудованием.

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

1. Провести обзор и анализ существующих конструкций оборудования для разработки грунта под подземным трубопроводом и предложить конструкцию данного оборудования для использования на базе гидравлического экскаватора.

2. Разработать математическую модель процесса взаимодействия рабочего органа телескопического фрезерного рабочего оборудования с грунтом.

3. Выявить зависимости, устанавливающие взаимосвязь между конструктивными и режимными параметрами телескопического фрезерного рабочего оборудования с учетом физико-механических свойств грунта.

4. Подтвердить адекватность теоретических результатов путем проведения экспериментальных исследований.

5. Разработать методику определения конструктивных и режимных параметров и практические рекомендации по созданию и проектированию телескопического фрезерного рабочего оборудования экскаватора.

Объектом исследования является рабочий процесс телескопического фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора.

Предметом исследования являются закономерности процесса взаимодействия телескопического фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора с разрабатываемым грунтом.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработана математическая модель процесса взаимодействия рабочего органа с грунтом, отличающаяся тем, что учитывает конструктивные и режимные параметры рабочего оборудования гидравлического экскаватора и напряженно-деформированное состояние разрабатываемого грунта.

2. Выявлены функциональные зависимости влияния скорости и угла резания грунта резцами рабочего органа на силу сопротивления разработки грунта, позволяющие определить требуемые мощность и крутящий момент привода телескопического фрезерного рабочего оборудования и его производительность.

3. Установлена зависимость условной относительной деформации грунта от скорости его разработки и поправочного коэффициента, зависящего от геометрии резца и угла резания, позволяющая оценить влияние данных параметров на крутящий момент гидромотора привода фрезерной головки.

4. Разработана методика определения параметров телескопического фрезерного рабочего оборудования, обеспечивающая минимизацию удельной энергоемкости процесса разработки грунта.

Теоретическая значимость работы заключается в теоретическом исследовании взаимодействия предлагаемого телескопического фрезерного рабочего оборудования с грунтом, отличающегося тем, что одновременно учитываются параметры вращательного и поступательного движения рабочего органа, геометрия и расположение режущих элементов, физико-механические свойства разрабатываемого грунта; установлении зависимостей крутящего момента и мощности телескопического фрезерного рабочего оборудования от его конструктивных и режимных параметров; в предлагаемой методике определения параметров рабочего оборудования, учитывающей влияние геометрических па-

раметров и угловой скорости вращения фрезерной головки на удельную энергоемкость процесса разработки грунта.

Практическая значимость результатов работы.

1. Предложена новая конструкция телескопического фрезерного рабочего оборудования экскаватора, позволяющего повысить эффективность разработки грунта под подземным трубопроводом (патенты РФ № 182718, № 193676, № 2760113).

2. Создано программное обеспечение для расчета параметров телескопического фрезерного рабочего оборудования и номограмма определения характеристик его привода.

3. Разработаны практические рекомендации по созданию и проектированию телескопического фрезерного рабочего оборудования экскаватора с учетом критерия минимизации удельной энергоемкости процесса разработки грунта.

Методология и методы исследований. Использован комплексный метод, включающий проведение теоретических и экспериментальных исследований. Основой являются базовые положения теории взаимодействия рабочих органов землеройных машин с разрабатываемыми грунтами, теории разрушения грунтов, теории механики грунтов, системного анализа, математического моделирования, методики планирования и оценки результатов эксперимента. Для проведения исследований по решению поставленных задач использовано программное обеспечение MATLAB, КОМПАС-3D (с приложением APM FEM).

Положения, выносимые на защиту: 1. Математическая модель работы телескопического фрезерного рабочего оборудования одноковшового экскаватора, учитывающая напряженно-деформированное состояние грунта, конструктивные и режимные параметры рабочего оборудования. 2. Функциональные зависимости сил сопротивления, моментов сил сопротивления разработки грунта конструктивными элементами рабочего органа, мощности телескопического фрезерного рабочего оборудования от угловой скорости вращения фрезерной головки, схемы и радиусов расстановки резцов на фрезерной головке, физико-механических свойств разрабатываемого грунта, а также геометрии резца. 3. Результаты экспериментальных исследований процесса взаимодействия рабочего органа телескопического фрезерного рабочего оборудования с разрабатываемым грунтом. 4. Методика определения конструктивных и режимных параметров телескопического фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора и номограмма определения характеристик привода рабочего органа.

Степень достоверности исследований обеспечивается корректностью необходимых допущений, подтверждением достоверности математической модели, использованием общепринятых методов математического моделирования и экспериментальных исследований.

Апробация результатов работы. Основные научные положения и результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на международной научно-технической конференции молодежи «Транснефть» (г. Омск, 2018), междуна-

родной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Омск, 2018), национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (г. Омск, 2018), международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (г. Омск, 2018), международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» (г. Омск, 2019), национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (г. Омск, 2019), международной научно-технической конференции молодежи «Транснефть» (г. Омск, 2019), международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (г. Москва, 2020), международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» (г. Омск, 2020), национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (г. Омск, 2020), международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» (г. Омск, 2020), 79-й международной научно-технической конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2021), международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» (г. Омск, 2021), международной научно-практической конференции «Научно-технические проблемы совершенствования транспорта энергоносителей и развития систем газоснабжения, водоснабжения и водоотведения» (г. Саратов, 2021), 79-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференция МАДИ (г. Москва, 2021), международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (г. Омск, 2021), национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (г. Омск, 2022), международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» (г. Омск, 2022), международной научно-технической конференции молодежи «Транснефть» (г. Омск, 2022), международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» (г. Омск, 2023).

Публикации по работе. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 28 научных работах, в том числе 5 публикаций – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ. Получены 1 патент РФ на изобретение, 2 патента РФ на полезную модель, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов, выводов и рекомендаций, библиографиче-

ского списка используемой литературы, включающего 119 наименований. Работа изложена на 168 страницах, содержит 83 рисунка и 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, излагаются цель и основные задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен обзор и анализ существующих конструкций оборудования для разработки грунта под трубопроводом, выявлены их основные недостатки. Проанализированы основные сведения о грунтах, необходимые для выполнения диссертационного исследования. Подробно рассмотрены теоретические исследования ученых в области процессов разработки грунтов. Исходя из анализа технологии проведения земляных работ, составлена общая структура работы, включающая в себя разработку математической модели, проведение лабораторных и экспериментальных исследований, разработку методологических и практических рекомендаций по совершенствованию оборудования для разработки грунта под трубопроводом.

Во второй главе изложены теоретические исследования процесса взаимодействия с грунтом рабочего органа телескопического фрезерного оборудования экскаватора. При этом приняты следующие допущения: рассматривается одномерная модель движения грунта под воздействием рабочего оборудования; рассматривается грунт однородной структуры; фрезерный рабочий орган совершает в грунте поступательное движение с постоянной скоростью; фрезерный рабочий орган вращается с постоянной угловой скоростью; корпус рабочего оборудования жестко зафиксирован; шнек является однозаходным; резец серийно производимый; шаг шнека постоянен.

Фрезерное рабочее оборудование (рисунок 1), закрепленное на рукояти экскаватора, опускается оператором в приямок траншеи и устанавливается перпендикулярно вертикальной оси трубопровода.

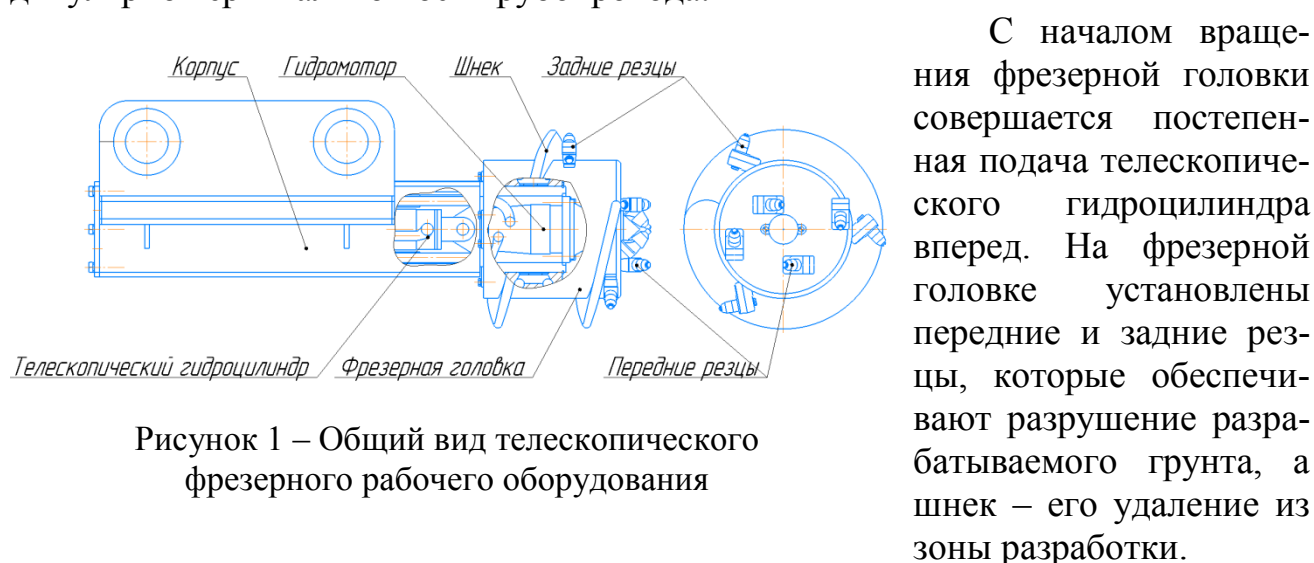


Рисунок 1 – Общий вид телескопического фрезерного рабочего оборудования

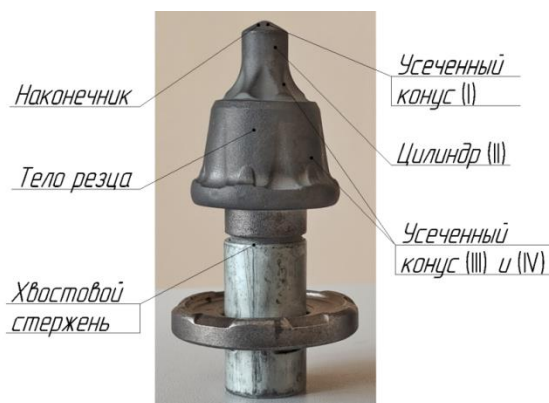


Рисунок 2 – Конструктивные элементы резца

Резец состоит из наконечника, тела резца и хвостового стержня (рисунок 2). Тело резца условно можно разделить на коническую и цилиндрическую части. При этом первый из усеченных конусов можно рассматривать в виде наконечника резца. Основными конструктивными элементами резца, участвующими в процессе разработки грунта, являются наконечник и тело. Установленные на фрезерной головке наконечники резцов внедряются в грунт и разрушают его.

Процесс резания представляет собой процесс отделения стружки рабочими частями резца с постоянной толщиной стружки h . Установлено, что толщина срезаемой стружки грунта зависит от угловой скорости вращения фрезерной головки ω и скорости подачи телескопического гидроцилиндра ϑ_{Π}

$$h = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \cdot \vartheta_{\Pi} \quad (1)$$

Профессор Зеленин А.Н. и другие ученые отмечали, что для обеспечения разрушения грунта в нем необходимо создать давление, превосходящее по величине предел прочности

$$P_{PO} > [\sigma_{пр}], \quad (2)$$

где P_{PO} – давление, создаваемое резцом; $[\sigma_{пр}]$ – предел прочности грунта.

Рассмотрим все этапы процесса взаимодействия с грунтом передних и задних резцов. Для определения силы внедрения наконечника переднего резца в грунт используется расчетная схема, представленная на рисунке 3. Зависимостью для определения силы внедрения наконечника резца в грунт служит

$$E_B = \iint_D U \cdot P \cdot f(Z) \sqrt{1 + f'^2(Z)} dS, \quad (3)$$

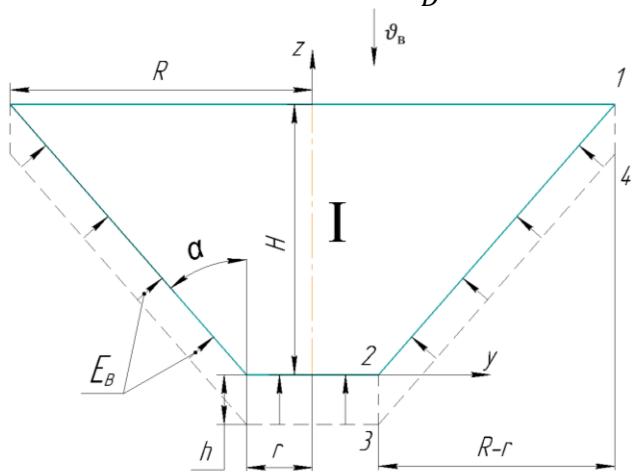


Рисунок 3 – Расчетная схема определения силы внедрения наконечника резца в грунт

где $U = \sin \alpha + \mu_0 \cos \alpha$; μ_0 – коэффициент трения; $f(Z)$ – уравнение образующей наконечника резца; $f(Z) = r + Z \operatorname{tg} \alpha$; dS – элементарная площадка поверхности грунта, взаимодействующего с усеченным конусом; P – давление грунта на боковую поверхность усеченного конуса

$$P = \frac{\gamma_0}{\varepsilon} \cdot \vartheta^2 \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (4)$$

где γ_0 – плотность грунта; ε – относительная деформация грунта; ϑ – линейная скорость движения резца; α – угол наклона образующей конуса к его оси.

С учетом выражений, полученных на основе расчетной схемы, зависимость полного сопротивления внедрению наконечника переднего резца в грунт выглядит следующим образом

$$E_B = \frac{\gamma_0}{\varepsilon} \cdot \vartheta^2 \cdot 0,94 \sqrt{h} \cdot \sum_{i=1}^3 (tg \alpha_i + \mu_0) \times tg^2 \alpha_i [(R_i + 0,5h tg \alpha_i)^{1,5} - (r_i + 0,5h tg \alpha_i)^{1,5}], \quad (5)$$

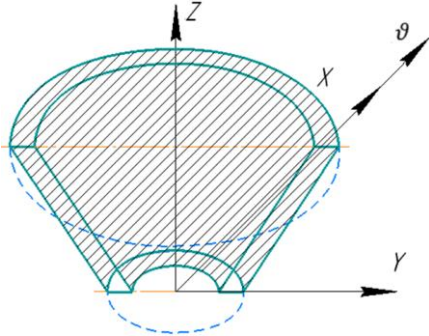


Рисунок 4 – Процесс отделения стружки

где R_i, r_i – больший и меньший радиусы i -го конуса соответственно; α_i – угол наклона образующей i -го конуса к его оси.

После внедрения начинается процесс резания грунта наконечником (рисунок 4). Силу сопротивления резанию грунта наконечником определим из двойного интеграла

$$\frac{E_{pr}}{2} = \iint_D P \frac{dz \cdot dy}{\cos(\vec{n} \wedge OX)} \cdot \cos(\vec{n} \wedge \vec{\vartheta}), \quad (6)$$

где D – область интегрирования 1234 (проекция части поверхности усеченного конуса, взаимодействующего с грунтом, на координатную плоскость ZOY (рисунок 3); $\cos(\vec{n} \wedge OX)$ – косинус угла между вектором нормали \vec{n} в произвольной точке поверхности усеченного конуса и координатной осью OX ; $\cos(\vec{n} \wedge \vec{\vartheta})$ – косинус угла между векторами нормали \vec{n} и окружной скорости $\vec{\vartheta}$.

После преобразований зависимость (6) принимает вид

$$E_{pr} = \frac{2 \gamma_0 \vartheta^2}{\varepsilon} \cdot J_p, \quad (7)$$

где

$$J_p = \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha_p \cdot J_{p1} + 3 \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin^2 \alpha_p \cdot \cos \alpha_p \cdot J_{p2} + 3 \sin^2 \alpha \cdot \sin \alpha_p \cdot \cos^2 \alpha_p \cdot J_{p3} + \frac{\sin^3 \alpha \cdot \cos^3 \alpha_p}{\cos \alpha} \cdot J_{p4}, \quad (8)$$

где

$$J_{p1} = \iint_D \frac{x^2 dz dy}{(r+z tg \alpha)^2}; \quad J_{p2} = \iint_D \frac{x dz dy}{r+z tg \alpha}; \quad (9)$$

$$J_{p3} = \iint_D dz dy; \quad J_{p4} = \iint_D \frac{(r+z tg \alpha) dz dy}{x}.$$

Полученная графическая зависимость функции J_p от толщины стружки и угла резания приведена на рисунке 5. Наибольшие значения функция J_p принимает при значении угла резания $(30 - 50)^\circ$. Толщина стружки также оказывает существенное влияние на значение функции. Зависимость принимает максимальное значение в данном интервале при толщине стружки 5 мм и величине угла резания 40° .

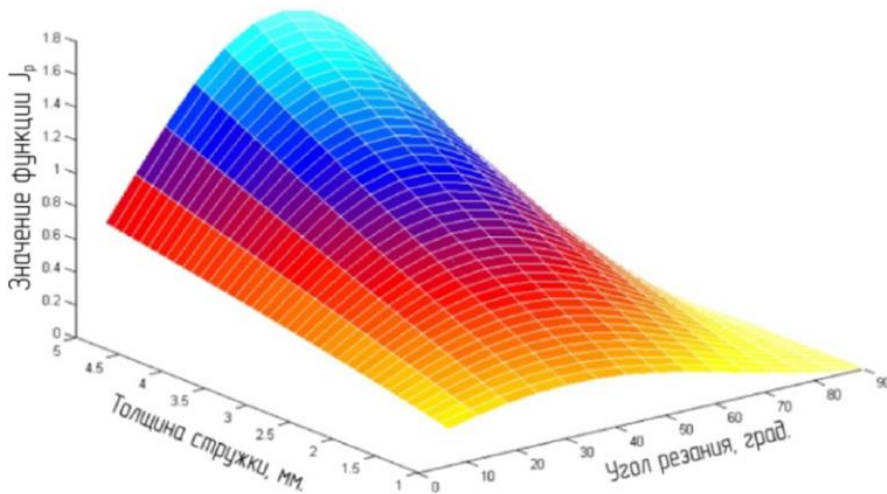


Рисунок 5 – Зависимость функции J_p от толщины стружки и угла резания

После срезания грунт перемещается вверх по поверхности тела резца в виде усеченного конуса. При этом грунт может накапливаться на передней поверхности резца. Он оказывает воздействие на резец, создавая дополнительную силу сопротивления резанию.

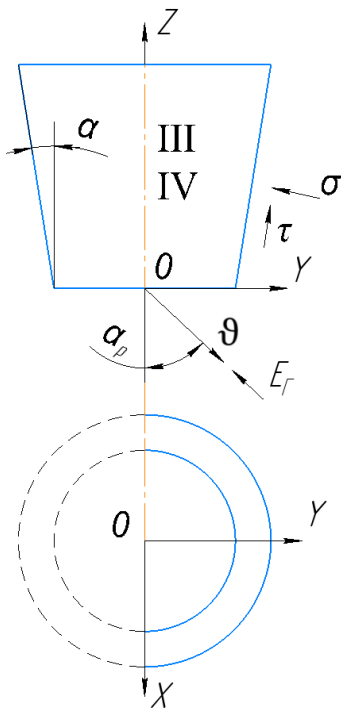


Рисунок 6 – Расчетная схема определения силы сопротивления резанию частью резца в виде усеченного конуса

С учетом этого установлены зависимости нормальной (10) и тангенциальной (11) составляющих силы сопротивления разработки грунта (рисунок 6)

$$E_{r\sigma} = \frac{\gamma_0 \vartheta^2}{\varepsilon} \cdot J_{k\sigma}; \quad (10)$$

$$E_{r\tau} = 2 \cdot \frac{\gamma_0 \vartheta^2}{\varepsilon} \cdot \frac{\mu_0}{\sin \alpha} \cdot J_{k\tau}, \quad (11)$$

где $J_{k\sigma}$, $J_{k\tau}$ – функциональные зависимости нормальной и тангенциальной составляющей силы сопротивления разработки грунт.

Функциональная зависимость нормальной составляющей силы сопротивления разработки грунта

$$J_{k\sigma} = (R^2 - r^2) \operatorname{ctg} \alpha \left(\frac{\cos^2 \alpha \cdot \sin^3 \alpha_p}{3} + \frac{3\pi}{32} \sin 2\alpha \cdot \sin 2\alpha_p \times \right. \\ \left. \times \sin \alpha_p + \frac{3}{4} \sin \alpha \cdot \cos \alpha_p \cdot \sin 2\alpha_p + \frac{\pi \sin^3 \alpha \cdot \cos^3 \alpha_p}{4 \cos \alpha} \right). \quad (12)$$

Сила трения, возникающая при резании грунта, направлена по образующей усеченного конуса (рисунок 6). Получим функциональную зависимость тангенциальной составляющей силы сопротивления разработки грунта

$$J_{k\tau} = \frac{(R^2 - r^2)}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \alpha_p + \\ + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \cdot \sin 2\alpha_p \cdot \cos \varphi + \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha_p) \times \\ \times (\sin \alpha_p \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi - \cos \alpha \cdot \cos \alpha_p) d\varphi, \quad (13)$$

где φ – полярный угол.

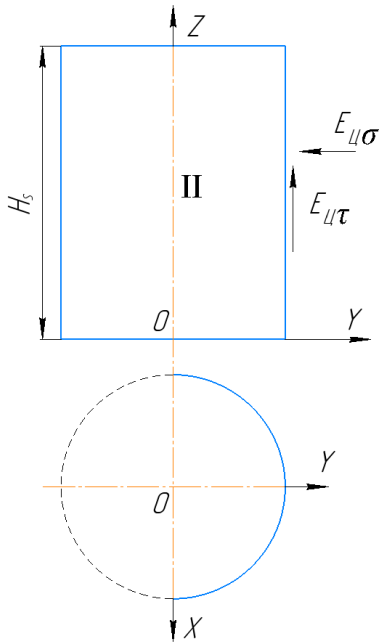


Рисунок 7 – Расчетная схема сил, действующих на цилиндрическую часть резца

Далее разрыхленный грунт перемещается вверх по цилиндрической части резца. Согласно расчетной схеме, сила сопротивления резанию цилиндрической частью резца определяется суммой нормальной и тангенциальной составляющих (рисунок 7). Так как угол наклона образующей цилиндра к его оси $\alpha = 0^\circ$, то нормальная составляющая силы сопротивления резанию цилиндрической частью резца определяется по зависимости

$$E_{ц\sigma} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\gamma_0 \vartheta^2}{\varepsilon} \cdot H_S \cdot \sin^3 \alpha_p \cdot r. \quad (14)$$

При этом тангенциальная составляющая силы сопротивления резанию

$$E_{ц\tau} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\gamma_0 \vartheta^2}{\varepsilon} \cdot H_S \cdot \mu_0 \cdot \cos \alpha_p \cdot r. \quad (15)$$

Полная горизонтальная сила на цилиндрической части резца определяется суммой сил зависимостей (14) и (15).

Если резец состоит из нескольких усеченных конических и цилиндрических частей, то применяя полученные зависимости, можно найти суммарную силу сопротивления резанию грунта резцом. Так как фрезерная головка в процессе работы совершает вращательное движение, необходимо использовать полученные зависимости сил сопротивления для определения необходимого крутящего момента гидромотора.

Резцы расположены таким образом, чтобы обеспечивать разрушение грунта во фронтальной плоскости. При этом каждый из резцов перекрывает только свой сектор, не затрагивая секторы резания соседних резцов. Зная радиусы расположения резцов и скорости их вращения, найдены зависимости крутящего момента и мощности, действующие на передние резцы.

Крутящий момент силы сопротивления, действующий на передние резцы, можно найти из зависимости

$$M_{\Pi} = \frac{9}{4} \cdot \frac{\gamma_0}{\varepsilon} \cdot F_1 \cdot \omega^2 \cdot r_n^3, \quad (16)$$

где F_1 – функция, зависящая от геометрических параметров резца, r_n – радиус вращения наружных резцов.

Мощность, необходимая для привода передних резцов

$$N_{\Pi} = \frac{9}{4} \cdot \frac{\gamma_0}{\varepsilon} \cdot F_1 \cdot \omega^3 \cdot r_n^3. \quad (17)$$

По аналогии, была разработана расчетная схема (рисунок 8) и получены зависимости сил сопротивления, действующих при разработке грунта задними резцами. Это позволило определить моменты сил, действующих на задние резцы.

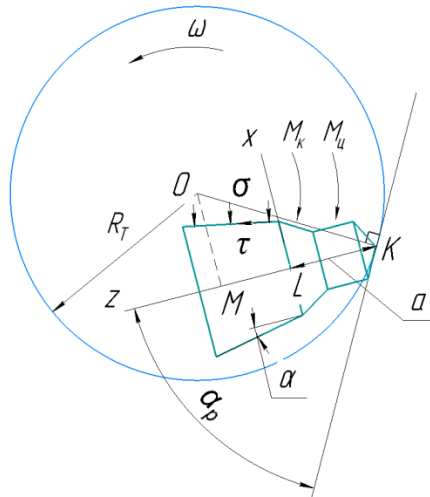


Рисунок 8 – Расчетная схема для определения моментов сил в различных точках заднего резца

Для решения сложных интегральных зависимостей крутящего момента также были разработаны программы в ПО «Matlab». В результате получены характеристики рабочего органа фрезерного рабочего оборудования с учетом заданных исходных данных (рисунки 9 – 12). Из рисунков 9 – 12 видно, что имеется значительная зависимость крутящего момента и мощности от угловой скорости и малая зависимость от угла резания, как для передних, так и для задних резцов.

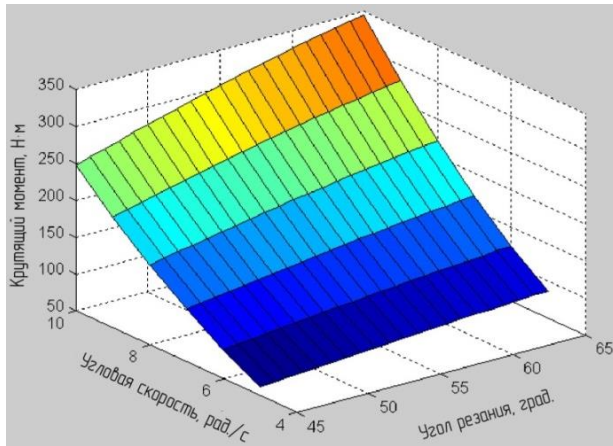


Рисунок 9 – Зависимость крутящего момента на передних резцах от угла резания и угловой скорости

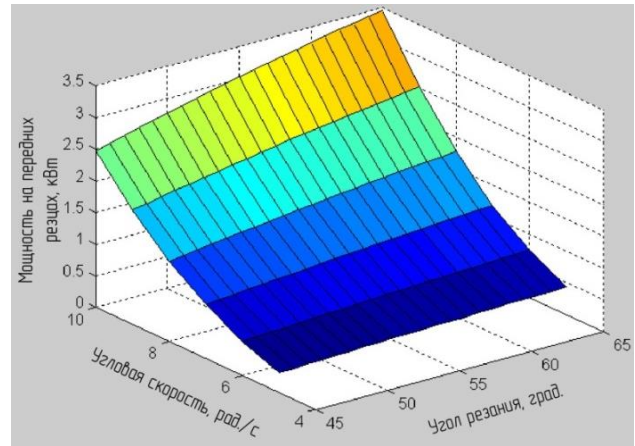


Рисунок 10 – Зависимость мощности на передних резцах от угла резания и угловой скорости

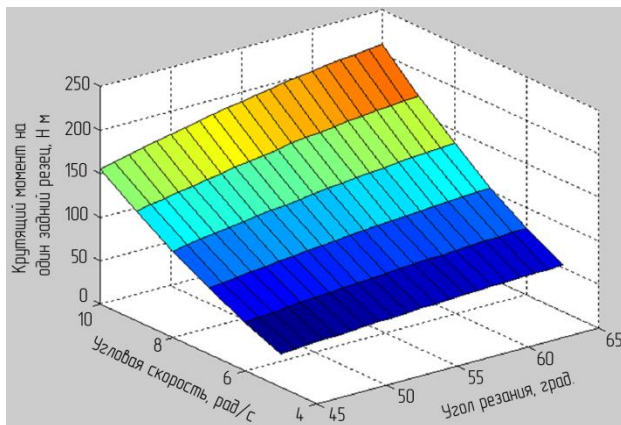


Рисунок 11 – Зависимость крутящего момента на один задний резец от угла резания и угловой скорости

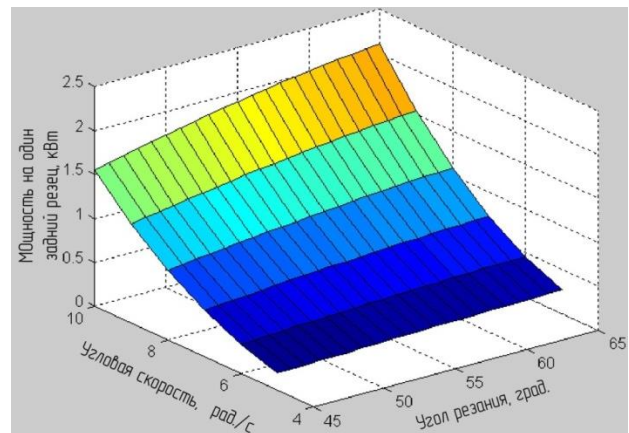


Рисунок 12 – Зависимость мощности на заднем резце от угла резания и угловой скорости

Одной из составляющих телескопического фрезерного рабочего оборудования экскаватора является шнек. Во время вращения фрезерной головки шнек удаляет разрушенный резами грунт. При этом на шнеке возникают силы сопротивления, которые необходимо учитывать при проектировании рабочего оборудования. Для определения требуемого крутящего момента и мощности привода используем методику, предложенную А.А. Вайнсоном, В.В. Красниковым.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по определению численных значений параметров, входящих в математическую модель взаимодействия рабочего органа телескопического фрезерного оборудования с грунтом, а также по подтверждению их адекватности теоретическим исследованиям.

Перед началом проведения исследований была выполнена подготовка грунта к проведению эксперимента и определены его основные параметры. При проведении эксперимента использован суглинистый грунт влажностью 15 %, с числом удара ударника 5 – 6, значением плотности 1600 кг/м³, коэффициентом сцепления 0,025 МПа и значением угла внутреннего трения 30°

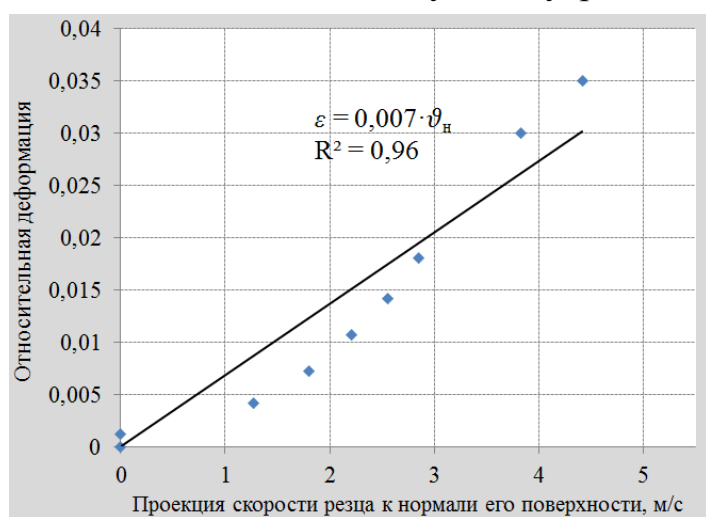


Рисунок 13 – Аппроксимация зависимости относительной деформации грунта от проекции скорости резца к нормали его поверхности (0 – 5 м/с)

Для определения относительной деформации талого грунта были проведены испытания при помощи лабораторного комплекса ЛКСМ-1К. По известным значениям силы на траверсе был построен график относительной деформации от проекции скорости резца к нормали его поверхности (рисунок 13). Проекция скорости на нормаль поверхности определяется следующим образом

$$v_n = \sqrt{\frac{p_c}{\gamma_0}} \cdot 10^3, \quad (18)$$

где p_c – значения напряжения от сжатия грунта.

Так как резец имеет сложную форму, то проекция его скорости на нормаль в любой точке поверхности неодинакова. Для более точного вычисления значения сил сопротивлений, действующих на резец, был введен поправочный коэффициент, учитывающий геометрические параметры резца (рисунок 14), который вычисляется по следующей зависимости

$$f_0 = \left[\sum_{i=1}^{n_p} (R_i^2 - r_i^2) / \sin \alpha_i \right] / \sum_{i=1}^{n_p} [(R_i^2 - r_i^2) / \sin \alpha_i] / f_y(\alpha_i, \alpha_{pi}), \quad (19)$$

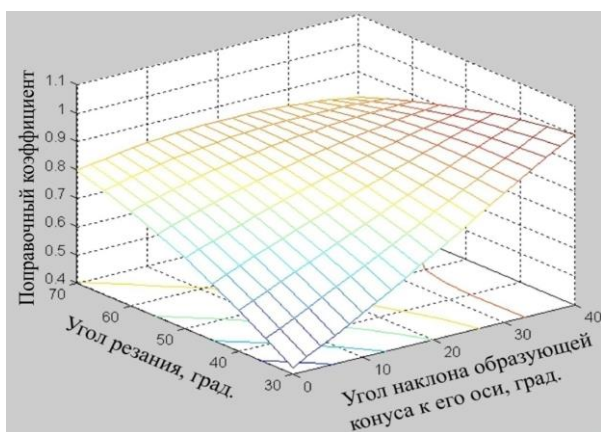


Рисунок 14 – Зависимость поправочного коэффициента относительной деформации грунта от угла резания и угла наклона образующей конуса к его оси

где n_p – количество частей резца; f_y – коэффициент, зависящий от угла резания и угла наклона образующей конуса к его оси.

В результате вводится понятие «условной относительной деформации грунта» – это деформация грунта, прямо пропорциональная скорости резания и поправочному коэффициенту

$$\varepsilon_y = 7 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta \cdot f_0. \quad (20)$$

Для определения силы резания грунта резцом была подготовлена экспериментальная установка (рисунок 15). На тележке 1, установленной на рельсовые пути 2, закреплена рама 6. На раме установлена державка с роликами 7, на которой закреплен резец 8. Привод державки с роликами осуществляется при помощи троса 5 и привода передвижения державки 4. Тензотяга 9, закрепленная одним концом к державке с роликами, а другим – к тросу, позволяет определить силу сопротивления резанию грунта 3.

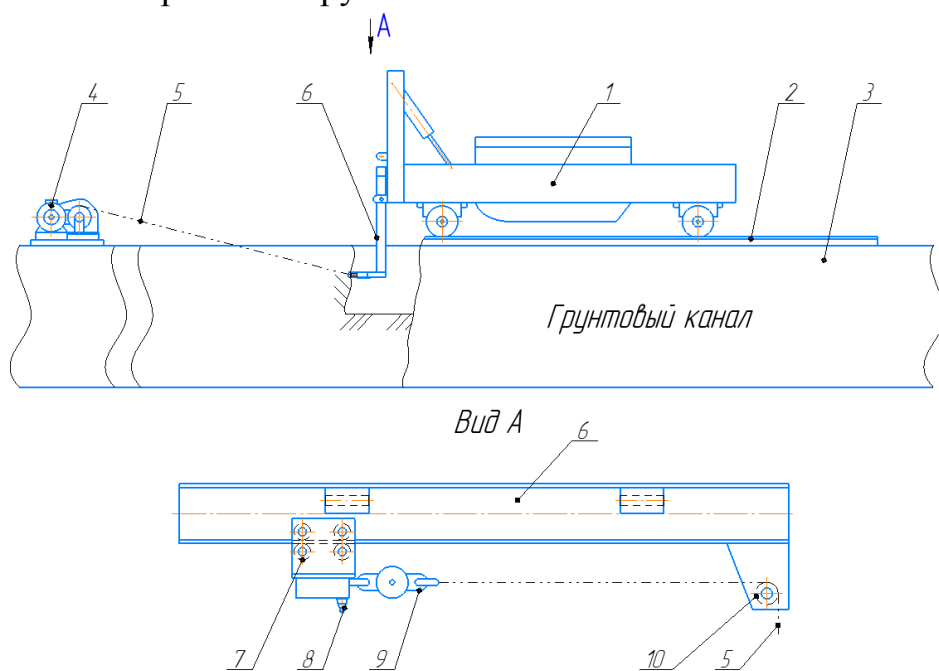


Рисунок 15 – Схема экспериментальной установки с резцом

Для замера силы натяжения троса была использована электронная тензотяга. Во время эксперимента исследовалась зависимость силы резания грунта резцом от скорости резца и угла резания. Исходя из результатов предыдущих исследований искомую зависимость силы резания запишем следующим образом

$$E_3 = C_y \cdot f_3(\vartheta) \cdot f_4(\alpha_p). \quad (21)$$

Также зависимость можно записать в следующем виде

$$E_{\text{Э}}' = \frac{E_{\text{Э}}}{C_{\text{y}}} = f_3(\vartheta) \cdot f_4(\alpha_{\text{p}}). \quad (22)$$

Для поиска значения зависимости был проведен двухфакторный эксперимент двух независимых переменных ϑ и α_{p} . План и матрица результатов эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения сил резания

| α , рад. | $\pi/4$ | $\pi/3$ | $\pi/2$ |
|-----------------|---------|---------|---------|
| v , м/с | | | |
| 0,15 | 112,1 | 125,3 | 141,6 |
| 0,30 | 138,8 | 148,9 | 169,5 |
| 0,60 | 190,5 | 197,7 | 207,1 |
| 1,00 | 219,3 | 229,5 | 237,4 |
| 1,50 | 237,3 | 240,9 | 270,5 |

После обработки результатов эксперимента зависимость (21) принимает вид:

$$E_{\text{Э}} = C_{\text{y}} \cdot 44,21 \cdot \vartheta^{0,3078} \cdot \alpha_{\text{p}}^{0,2106}. \quad (23)$$

Зависимость (23) представлена графически на рисунке 16.

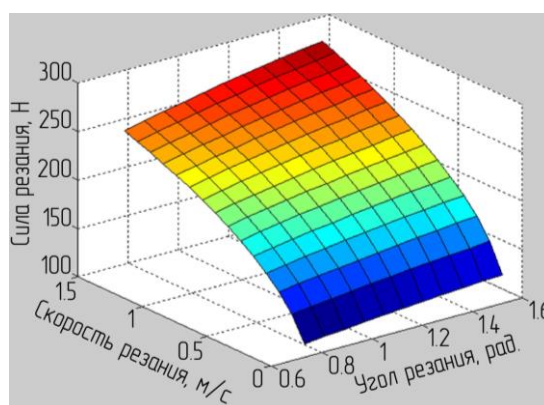


Рисунок 16 – Зависимость силы резания грунта резцом от скорости и угла резания

В связи с тем, что резец, установленный на фрезерной головке, движется по круговой траектории, дополнительно был выполнен эксперимент с использованием установки, представленной на рисунке 17. Эксперимент проводился следующим образом. Вначале запускалось вращение фрезерной головки до достижения установленной частоты вращения. Затем производилась постепенная подача фрезерной головки в направлении оси её вращения, что приводило к постепенному внедрению резца в грунт. Затрачиваемая мощность фиксировалась при полном погружении резца в грунт. Так как мощность и крутящий момент связаны, можно найти последний, измеряя значения мощности при различных режимах работы.

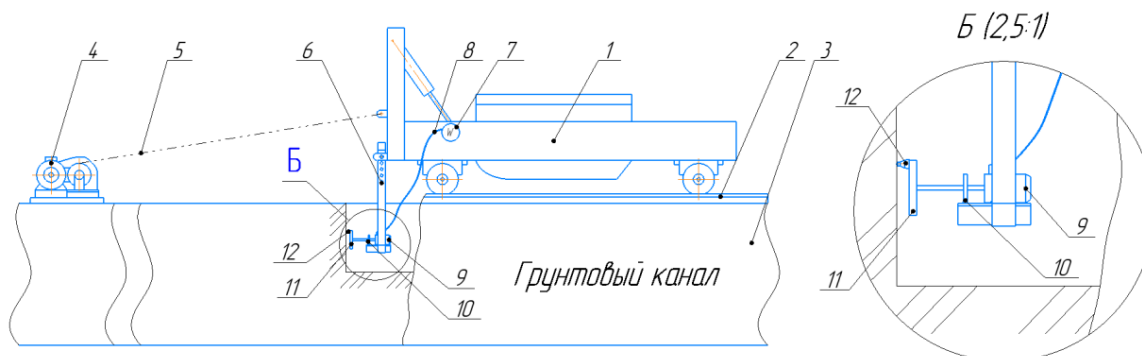


Рисунок 17 – Схема экспериментальной установки с фрезерной головкой
 1 – тележка; 2 – рельсовые пути; 3 – грунт; 4 – привод передвижения тележки;
 5 – трос; 6 – рама; 7 – ваттметр; 8 – кабель питания; 9 – мотор-редуктор;
 10 – опорный подшипник; 11 – фрезерная головка; 12 – резец

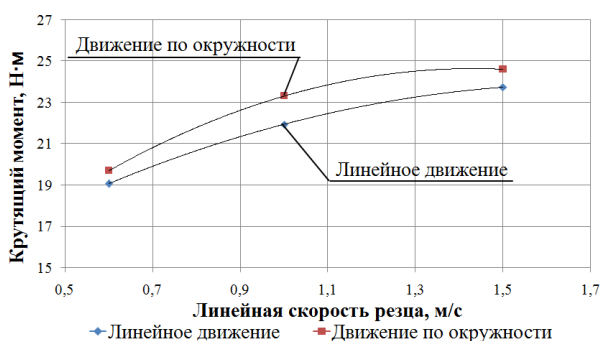


Рисунок 18 – Зависимость крутящего момента сопротивления резанию грунта от линейной скорости резца

В результате была получена зависимость (рисунок 18), отражающая значения крутящего момента при линейном движении резца и при движении по окружности. Критерий Стьюдента полученных результатов составляет $t_{экс} = 1,33$, а его теоретическое значение $t_M = 2,77$. Следовательно, для оценки адекватности разработанной математической модели можно использовать данные, представленные в таблице 1.

Для проверки адекватности разработанной математической модели была составлена матрица отклонений. Математическое ожидание M_{Δ} составило 0,0962 Н, среднеквадратическое отклонение элементов матрицы $\sigma_{\Delta} = 6,68$ Н, критерий Стьюдента $t_{\Delta} = 1,83$, а справочное значение критерия Стьюдента $t_T(0,05, 13) = 2,16$. Так как критерий Стьюдента ниже соответствующего теоретического значений, то можно сделать вывод о том, что отклонения теоретических значений от экспериментальных вызваны случайными воздействиями при проведении эксперимента. Выполняются оба условия адекватности математической модели: 1) отклонения теоретических значений от экспериментальных представляет собой случайную величину; 2) математическое ожидание (средняя величина) отклонений стремится к нулю. Следовательно, математическая модель считается адекватной.

С учетом зависимости (23) определен крутящий момент на заднем резце

$$M_Z = C_y \cdot 44,21 \cdot \omega^{0,3078} \cdot \left(R_T - l_p \cdot \sin \frac{\alpha_p}{2} \right)^{1,3078} \cdot \alpha_p^{0,2106}. \quad (24)$$

Для передних резцов суммарный крутящий момент определяется по формуле

$$M_P = 2 \cdot C_y \cdot 44,21 \cdot \omega^{0,3078} \alpha_p^{0,2106} (r_H^{1,3078} + r_B^{1,3078}). \quad (25)$$

Суммарный крутящий момент на задних и передних резцах

$$M_C = M_P + N \cdot M_Z = C_y \cdot 44,21 \cdot \omega^{0,3078} \alpha_p^{0,2106} \times \\ \times \left\{ 2(r_H^{1,3078} + r_B^{1,3078}) + N \cdot \left(R_T - l_p \cdot \sin \frac{\alpha_p}{2} \right)^{1,3078} \right\}, \quad (26)$$

где N – количество задних резцов.

Для исследуемого рабочего органа зависимость (26) определяется

$$M_C = 277 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (27)$$

Экспериментальные исследования процесса удаления грунта шнеком проводились с использованием экспериментальной установки, представленной на рисунке 17, в которой вместо фрезерной головки был установлен исследуемый шнек. В процессе эксперимента измерялась мощность, затрачиваемая на привод шнека, что позволило определить крутящий момент. По известной методике был проведен расчет крутящего момента и мощности шнека, изображенного на рисунке 19.



Рисунок 19 – Вид экспериментального шнека

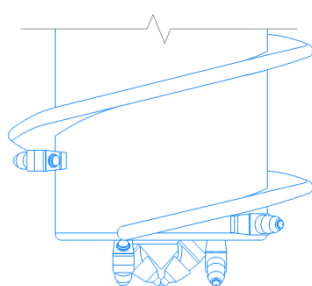


Рисунок 20 – Вид проектируемого шнека

При сравнении результатов теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что методика обеспечивает получение достоверных значений исследуемых величин.

Это позволило определить необходимый крутящий момент и мощность для привода шнека рабочего оборудования, изображенного на рисунке 20.

В четвертой главе представлены рекомендации к практическому применению результатов исследования телескопического фрезерного рабочего оборудования. Для практического использования результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана методика определения основных параметров и режимов работы рабочего органа.

Из анализа теоретических зависимостей следует, что крутящий момент на резцах пропорционален квадрату угловой скорости. Определим графические зависимости отношения крутящего момента на резцах к квадрату угловой скорости вращения фрезерной головки от угла резания (рисунки 21, 22)

$$\frac{M_3}{\omega^2} = f_1(\alpha_p); \quad (28)$$

$$\frac{M_{\Pi}}{\omega^2} = f_2(\alpha_p), \quad (29)$$

где M_3 – крутящий момент на одном заднем резце, M_{Π} – суммарный крутящий момент на передних резцах.

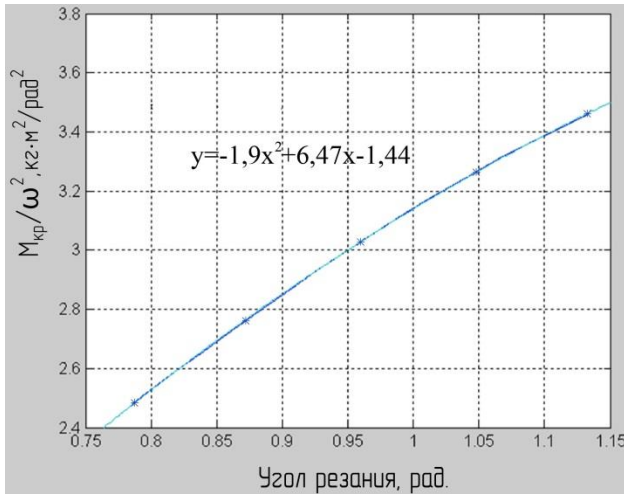


Рисунок 21 – Зависимость $M_{кр}/\omega^2$ от угла резания на передних резцах

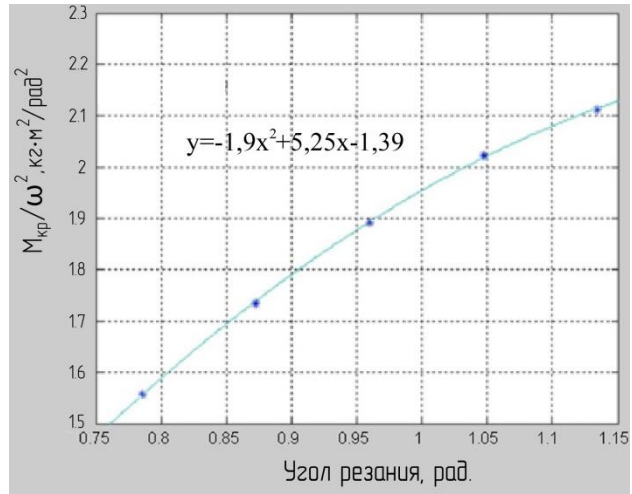


Рисунок 22 – Зависимость $M_{кр}/\omega^2$ от угла резания на одном заднем резце

Находим, что функции (рисунки 21, 22) аппроксимируются квадратичной зависимостью. С учетом того, что суммарный крутящий момент пропорционален величине $\frac{\gamma}{\varepsilon}$, а резцы имеют разную угловую скорость, при вычислении суммарного крутящего момента используем следующую зависимость

$$\sum M = \frac{\omega}{7 \cdot 0,763} \cdot \left[\frac{N \cdot (5,25\alpha_p - 1,9\alpha_p^2 - 1,39)}{R_T} + \frac{8 \cdot (6,47\alpha_p - 1,9\alpha_p^2 - 1,44)}{9 \cdot r_H} + \frac{(6,47\alpha_p - 1,9\alpha_p^2 - 1,44)}{9 \cdot r_B} \right]. \quad (30)$$

Данная зависимость учитывает полученный ранее поправочный коэффициент, который оказывает существенное влияние на значение крутящего момента. Было выполнено сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей суммарного крутящего момента (рисунок 23, 24). Для значения угла резания 0,9 радиан получены теоретическая и экспериментальная зависимости крутящего момента от угловой скорости, показывающие высокую сходимость теоретических и экспериментальных данных (рисунок 25). Критерий Стьюдента составляет 1,98, справочное значение которого для исследуемого случая равно 2,1. Следовательно, отклонения носят случайный характер.

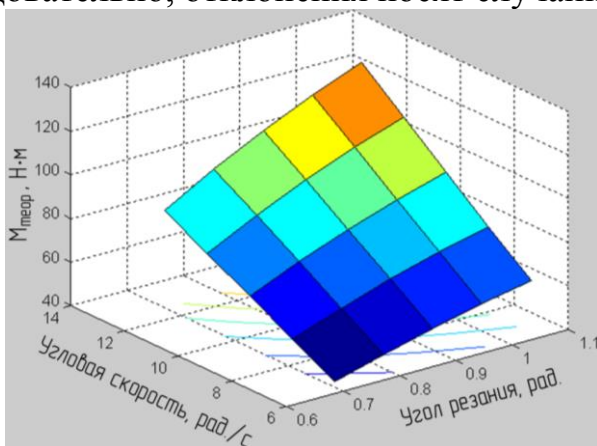


Рисунок 23 – Теоретическая зависимость суммарного крутящего момента

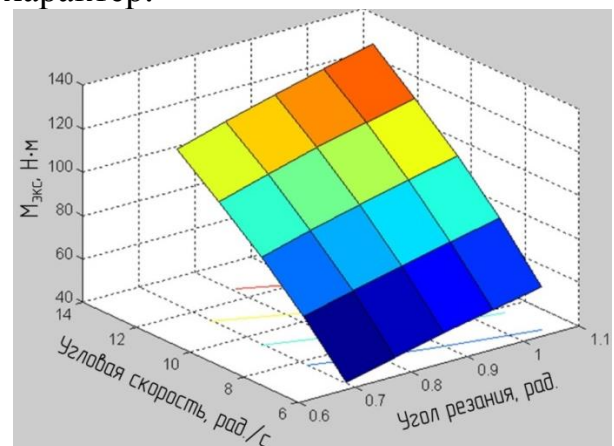


Рисунок 24 – Экспериментальная зависимость суммарного крутящего момента

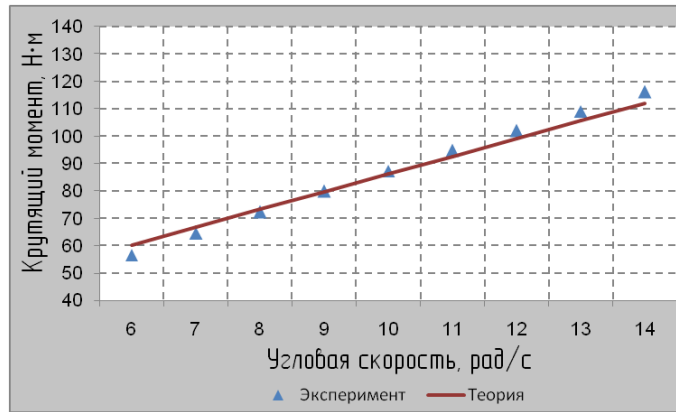


Рисунок 25 – Теоретическая и экспериментальная зависимости суммарного крутящего момента для привода резцов от угловой скорости

Для удобства использования полученных зависимостей была создана номограмма, которая позволяет без применения расчетов получить результат по известным параметрам (рисунок 26).

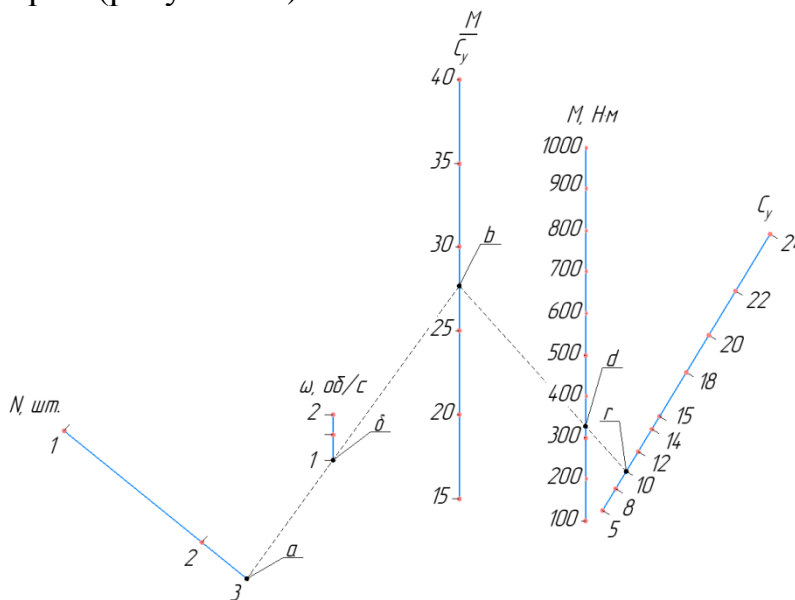


Рисунок 26 – Номограмма определения характеристик привода рабочего оборудования

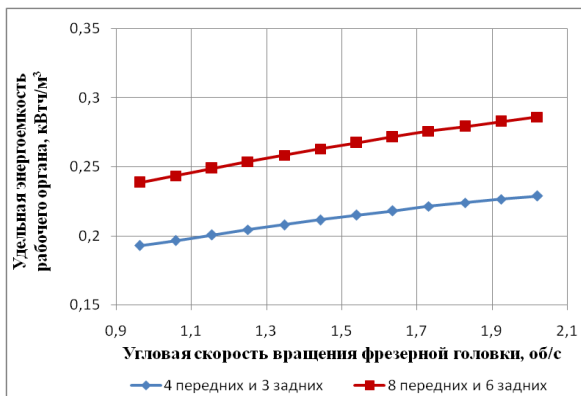


Рисунок 27 – Зависимость удельной энергоёмкости рабочего органа от угловой скорости вращения фрезерной головки

В качестве критерия эффективности выступала удельная энергоёмкость рабочего органа (рисунок 27). При анализе полученного графика видно, что у рабочего органа, оснащенного 4 передними и 3 задними резцами, удельная энергоёмкость на 25% ниже, чем у рабочего органа с 8 передними и 6 задними резцами.

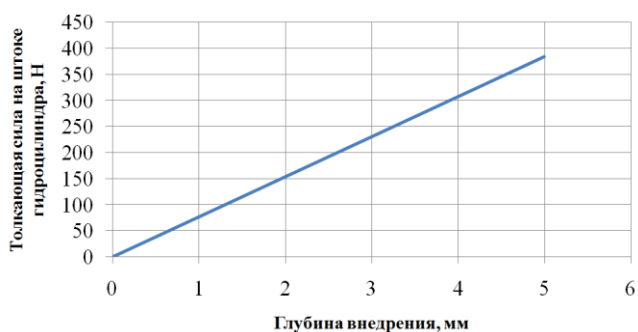


Рисунок 28 – Зависимость толкающей силы на штоке гидроцилиндра от глубины внедрения резцов в грунт

Для выбора гидроцилиндра рабочего оборудования предлагается использовать зависимость толкающей силы на штоке гидроцилиндра от глубины внедрения резцов в грунт (рисунок 28). Из полученного графика видно, что при числе ударов ударника ДорНИИ равном 5 и глубине внедрения 5 мм необходимая толкающая сила гидроцилиндра должна превышать 390 Н.

Ожидаемый экономический эффект применения телескопического фрезерного рабочего оборудования экскаватора составит более 350 тысяч рублей в год на одну единицу техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненной работы получены следующие основные результаты и выводы:

1. На основе проведенного анализа конструкций оборудования для разработки грунта под подземным трубопроводом доказана необходимость совершенствования существующих решений в исследуемой области. Предложена эффективная конструкция рабочего оборудования гидравлического экскаватора для разработки грунта под подземным трубопроводом, совмещающая в себе вращательное движение фрезерной головки с установленными на ней резцами и шнеком и поступательное движение телескопического гидроцилиндра.

2. Разработана математическая модель процесса взаимодействия рабочего органа телескопического фрезерного рабочего оборудования экскаватора с разрабатываемым грунтом, учитывающая схему расположения резцов, угол их установки на фрезерной головке, скорость её вращения, а также напряженно-деформированное состояние грунта, позволяющая определить требуемые мощность и крутящий момент привода рабочего оборудования.

3. Получены регрессионные зависимости силы сопротивления резанию грунта резцом рабочего органа от скорости и угла резания. Установлено, что при увеличении скорости резания от 0,15 до 1,5 м/с сила сопротивления резанию возрастает в 2 раза. С уменьшением угла резания с 90° до 35° сила сопротивления резанию снижается на 20 %. При значении угла резания α_p более 65° ухудшается удаление срезанного грунта из забоя. Поэтому значение угла резания рекомендуется ограничить верхним пределом $\alpha_p = 65^\circ$.

Доказано, что условная относительная деформация грунта оказывает существенное влияние на силу сопротивления разработки грунта и прямо пропорциональна скорости движения резца и поправочному коэффициенту f_0 . Получен-

ная величина поправочного коэффициента f_0 зависит от геометрии резца и угла резания.

4. Создан стенд и методика проведения экспериментальных исследований взаимодействия конструктивных элементов рабочего оборудования с грунтом, позволяющих подтвердить полученные результаты математического моделирования. Оценка адекватности теоретических и экспериментальных исследований показала их высокую сходимость, при этом расхождение значений не превышает 12 %.

5. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана методика определения параметров телескопического фрезерного рабочего оборудования экскаватора, позволяющая обеспечить минимизацию удельной энергоемкости процесса разработки грунта. Прилагаемая к методике номограмма дает возможность без выполнения расчетов определить требуемое значение крутящего момента гидромотора для привода фрезерной головки с использованием минимального количества входных параметров.

Установлена зависимость толкающей силы гидроцилиндра телескопического фрезерного рабочего оборудования от предела прочности грунта и геометрических параметров резца.

Обоснованы рациональные параметры рабочего органа, обеспечивающие минимальную удельную энергоемкость процесса разработки грунта:

- фрезерную головку необходимо оснащать четырьмя передними и тремя задними резцами, а значение угла резания должно находиться в диапазоне от 45 до 60 градусов;

- при разработке талого грунта влажностью 15 %, числом ударов ударника $C_y = 5$, величине угла резания 45° и при угловой скорости вращения фрезерной головки ω , равной 6,28 рад/с, крутящий момент гидромотора M составит 188 Н·м;

- при разработке талого грунта влажностью 15 %, числом ударов ударника $C_y = 10$, величине угла резания 60° и при угловой скорости вращения фрезерной головки ω , равной 12,5 рад/с, крутящий момент гидромотора M составит 390 Н·м.

Направления и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации заключаются в повышении эффективности и надежности фрезерного рабочего оборудования землеройных и землеройно-транспортных машин, повышении точности позиционирования их рабочих органов, обеспечении безопасности и роботизации выполнения земляных работ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Демиденко А.И., Кузнецов И.С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора / А.И. Демиденко, И.С. Кузнецов // Вестник СибАДИ, 2020. – Т. 17. №1 (71). – С. 12-21. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>.

2. Кузнецов И. С. Теоретические исследования процесса взаимодействия резца фрезерного рабочего оборудования экскаватора с грунтом // Вестник СибАДИ, 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 42-50. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-42-50>.

3. Кузнецов И.С. Анализ экономической эффективности применения фрезерного рабочего оборудования экскаватора для подкопа трубопровода // Вестник СибАДИ, 2021. – Т. 18. №5 (81). – С. 488 – 496. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-488-496>.

4. Кузнецов И. С. Определение крутящего момента фрезерного рабочего оборудования экскаватора для ремонта трубопровода // Вестник СибАДИ. 2023. Т.20, № 1 . С. 24-33. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-24-33>.

5. Кузнецов И.С., Савельев С.В. Определение характеристик фрезерного рабочего оборудования экскаватора // Вестник СибАДИ. 2023; 20(3):316-325. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-316-325>.

Патенты и свидетельства:

1. Пат. на полез. модель № 182718 U1 Российская Федерация, МПК E02F 3/06. Рабочее оборудование одноковшового экскаватора: № 2018114359: заявл. 18.04.2018: опубл. 29.08.2018 / А. И. Демиденко, И. С. Кузнецов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

2. Пат. на полез. модель № 193676 U1 Российская Федерация, МПК E02F 3/06, E02F 9/24. Рабочее оборудование экскаватора: № 2019117815: заявл. 07.06.2019: опубл. 11.11.2019 / А. И. Демиденко, И. С. Кузнецов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

3. Пат. № 2760113 С1 Российская Федерация, МПК E02F 9/22, E02F 3/28. Гидравлическая система фрезерного рабочего оборудования экскаватора: № 2021110084: заявл. 13.04.2021: опубл. 22.11.2021 / Н. С. Галдин, И. С. Кузнецов, А. И. Демиденко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет».

4. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2020662840 Российская Федерация. Расчет параметров шнека фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора: № 2020660835: заявл. 24.09.2020: опубл. 20.10.2020 / И. С. Кузнецов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет».

5. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2021612487 Российская Федерация. Расчет режимных параметров фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора: № 2021611343: заявл. 10.02.2021: опубл. 18.02.2021 / И. С. Кузнецов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет».

6. Свид. о гос. рег. прог. для ЭВМ № 2022612089 Российская Федерация. Формирование номограммы для определения параметров фрезерного рабочего оборудования экскаватора: № 2022611123: заявл. 02.02.2022: опубл. 08.02.2022 / И. С. Кузнецов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет».

Статьи в сборниках материалов конференций и других изданиях:

1. Кузнецов И. С. Анализ методов подкопа трубопровода // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных* (Омск, 08-09 февраля 2018 г.). – Омск: СибАДИ, 2018. – С. 42–45.

2. Демиденко А.И., Кузнецов И. С. Рабочее оборудование для подкопа нефтепровода // *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции* (Омск, 29-30 ноября 2018 г.). – Омск: СибАДИ, 2019. – С. 13–16.

3. Кузнецов И. С. Выбор параметров фрезерного рабочего оборудования экскаватора // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных* (Омск, 07-08 февраля 2019 г.). – Омск: СибАДИ, 2019. – С. 19–22.

4. Демиденко А.И., Кузнецов И. С. Анализ устройств предотвращения повреждения стенки трубопровода // *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов II Национальной научно-практической конференции* (Омск, 18-19 апреля 2019 г.). – Омск: СибАДИ, 2019. – С. 7–9.

5. Демиденко А.И., Кузнецов И. С. Система для предотвращения повреждения трубопровода фрезерным рабочим оборудованием экскаватора // *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции* (Омск, 28-29 ноября 2019 г.). – Омск: СибАДИ, 2019. – С. 14–17.

6. Кузнецов И. С. Расчет сил сопротивления резанию фрезерным рабочим оборудованием экскаватора // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных* (Омск, 06-07 февраля 2020 г.). – Омск: СибАДИ, 2020. – С. 11–14.

7. Демиденко А.И., Кузнецов И. С. Кинематика движения резцов фрезерного рабочего оборудования экскаватора // *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции* (Омск, 23-24 апреля 2020 г.). – Омск: СибАДИ, 2020. – С. 14–16.

8. Демиденко А.И., Кузнецов И. С. Расчет параметров шнека фрезерного рабочего оборудования экскаватора с применением программного комплекса «MATLAB» // *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ»* (Омск, 03-04 декабря 2020 г.). – Омск: СибАДИ, 2021. – С. 12–15.

9. Кузнецов И. С. К вопросу повышения эффективности земляных работ при ремонте трубопроводов // *Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения* – Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2021. – С. 50–54.

10. Кузнецов И. С. Исследование процесса взаимодействия резца фрезерного рабочего оборудования экскаватора с контактной средой // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов V Международной научно-*

практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (Омск, 04-05 февраля 2021 г.). – Омск: СибАДИ, 2021. – С. 19–22.

11. Кузнецов, И. С. Моделирование процесса работы оборудования для ремонта трубопровода / И. С. Кузнецов // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных : сборник материалов VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к 110-летию со дня рождения Т.В. Алексеевой*, Омск, 20–21 апреля 2023 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2023. – С. 30-33.

12. Кузнецов И. С., Демиденко А.И. Расчет сил сопротивления фрезерованию грунта рабочим оборудованием экскаватора // *Семьдесят четвертая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции* (Ярославль, 21 апреля 2021 г.). – Ярославль: ЯГТУ, 2021. – С. 402–405.

13. Кузнецов И. С. Особенности технологии применения фрезерного рабочего оборудования экскаватора для подкопа трубопровода // *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции* (Омск, 25-26 ноября 2021 г.). – Омск: СибАДИ, 2021. – С. 18–21.

14. Кузнецов И. С., Демиденко А.И. Экспериментальные исследования процесса резания талого грунта резцом фрезерного рабочего оборудования экскаватора // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2022. – № 3. – С. 32-43. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-3-32-43>.

15. Кузнецов И. С. Условия проведения экспериментальных исследований шнека фрезерного рабочего органа / И. С. Кузнецов // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных* (Омск, 10-11 февраля 2022 г.). – Омск: СибАДИ, 2022. – С. 16–18.

16. Кузнецов И. С., Демиденко А.И. Расчет на прочность конструкции рабочего оборудования экскаватора // *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции* (Омск, 23-24 апреля 2020 г.). – Омск: СибАДИ, 2022. – С. 9–12.

17. Кузнецов И. С. Применение гидравлической системы экскаватора для привода фрезерного рабочего оборудования // *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции* (Омск, 24-25 ноября 2022 г.). – Омск: СибАДИ, 2022. – С. 26–29.

Подписано к печати 01.11.2023 Формат 60x90 1/16.

Печать оперативная. Бумага офсетная.

Усл. п. л. 1,5. Тираж 100 экз.

Отпечатано в издательско-полиграфическом комплексе
ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.