

На правах рукописи



ТИЛЛОЕВ КУДРАТУЛЛО ЗУВАЙДУЛЛОЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА НОВОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ
ГЛУБОКОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА В ВИДЕ КОНУСНОГО
РАСКАТЧИКА**

Специальность:

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Колесных и гусеничных машин» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Научный руководитель: **Кондаков Сергей Владимирович**,
доктор технических наук, профессор кафедры колесных и гусеничных машин ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ)

Официальные оппоненты: **Мартюченко Игорь Гаврилович**,
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., кафедра «Транспортное строительство»
Кузнецова Виктория Николаевна,
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет «СибАДИ», кафедра «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»**

Защита диссертации состоится 23 сентября 2021 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.165.04 в Нижегородском государственном техническом университете по адресу: 603600, г. Нижний Новгород, ГСП-41, ул. Минина, д. 24, ауд. 1313.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета и на сайте <https://www.nntu.ru/structure/view/podrazdeleniya/fpsvk/obyavleniya-o-zashhitah>

Автореферат разослан « ___ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Л.Н. Орлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Строительство промышленных и гражданских зданий на просадочных грунтах всегда сопровождается сложностями в период эксплуатации за счет проявления неравномерных просадок и деформаций основания фундаментов, приводящих к аварийным ситуациям, либо к невозможности эксплуатации здания. Для устранения этих проблем требуются дополнительные затраты от общей стоимости объекта в объеме до 15%.

Просадочные и насыпные грунты характеризуются недостаточно высокой несущей способностью, ухудшением физико-механических свойств при увлажнении, повышенной сжимаемостью и низкой устойчивостью на высоких сейсмических зонах. Проблемы, возникающие при строительстве сооружений на просадочных и насыпных грунтах, могут быть решены уплотнением грунтовых оснований механическими способами.

Новое направление совершенствования машин для уплотнения грунта, которому посвящена диссертационная работа – это уплотнение на большую глубину конусным раскатчиком, которое позволяет увеличить несущую способность, повышает прочностные характеристики, минимизирует фильтрацию воздуха как внутри всего основания фундаментов, так и сквозь его отдельные элементы для обеспечения устойчивости структуры грунта.

Всё вышеизложенное определяет актуальность разработки новой техники для уплотнения грунтовых оснований под фундаменты. Механизмы для уплотнения грунтовых оснований промышленных и гражданских объектов часто базируются на шасси серийно выпускаемых гусеничных машин (например, экскаваторов). То есть эти механизмы относятся к области исследования строительных машин согласно паспорту специальности 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины.

Степень разработанности темы исследования. В процесс исследования машин для глубинного уплотнения грунта неоценимый вклад внесли такие ученые, как: А.Б. Ермилов, А.Н. Зеленин, Ю.Е. Пономаренко, Г.К. Бондарик, А.С. Вазетдинов, В.И. Коноплев, В.Д. Лис, В.И. Минаев, Н.И. Наумец, В.К. Тимошенко, В.Г. Федоровский, R. Naefeli, Д.И. Шор, J. Curic, K.J. Blum, W.F. Van Impe. А машины для поверхностного уплотнения грунта рассмотрены в исследованиях В.И. Баловнева, Н.Я. Хархуты, А.И. Доценко, К.К. Шестопалова, Г.В. Кустарева, И.В. Бояркиной, В.Н. Тарасова, О. Рейнольдса, L. Forssblad и др, а также в трудах научных школ: МАДИ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, СибАДИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАМИ, НАМИ и других.

Работы вышеупомянутых ученых содержат теоретические и практические исследования машин для уплотнения просадочных грунтов механическим способом – как поверхностного уплотнения (с помощью дорожных катков с вальцами, диаметр которых доходит до 2000 мм; толщина уплотняемого слоя достигает от 0,3 до 0,9 м), так и глубинного уплотнения (с помощью оборудования для глубинного уплотнения грунта в виде многотонных конусообразных грузов, либо раскатчиков в виде винта. Данные механизмы уп-

лотняют грунт на большую глубину, достигающую 4-6 м. Плотность грунта повышается на 20-30% и в 2-3 раза увеличивается его несущая способность. Коэффициент уплотнения достигает $K_y=0.98\dots 1.02$ свай без выемки грунта).

Область исследования

1. Методика выбора рациональных параметров конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунта;

2. Математическая модель кинематики, статического и динамического взаимодействия конусного раскатчика с грунтом.

Эти положения согласуются с пунктами 1,2,3 паспорта научной специальности 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины:

1. Методы оптимизационного синтеза машин, их функциональных механизмов, комплектов и систем.

2. Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения.

3. Совершенствование технологических процессов на основе новых технических решений конструкций машин.

Объектом исследования является конструкция нового рабочего органа в виде конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунтовых оснований под фундаменты промышленных и гражданских объектов.

Предметом исследования являются закономерности процесса взаимодействия конструкции конусного раскатчика с грунтом.

Целью работы является совершенствование теории расчета и проектирования новой конструкции конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунтовых оснований под фундаменты промышленных и гражданских объектов.

Задачи исследований:

– проанализировать существующие методы формирования скважин и конструкции механизмов для глубокого уплотнения грунта;

– разработать и исследовать математическую модель процесса взаимодействия конусного раскатчика и уплотняемого грунта;

– экспериментально исследовать работоспособность конусного раскатчика в лабораторных условиях;

– оценить устойчивость базового гусеничного экскаватора при установке нового технологического оборудования – конусного раскатчика;

– обобщить результаты теоретического и экспериментального исследования, доказать достоверность математической модели взаимодействия конусного раскатчика с грунтом.

Научная новизна состоит в следующем:

– разработана и численно реализована математическая модель статического взаимодействия конусного раскатчика и уплотняемого грунта, включающая особенности формирования контактной поверхности рабочего органа со скважиной;

- получен метод динамического расчета эффективности работы конусного устройства для уплотнения грунта, учитывающий неравномерность распределённой силы в пятне контакта;
- обоснована методика расчета устойчивости базовой машины, работающей с новым технологическим оборудованием – конусным раскатчиком для уплотнения грунта, учитывающая особенности формирования нагрузки от конусного раскатчика.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость.

1. Разработана и численно реализована математическая модель статического взаимодействия конусного устройства с грунтом при глубоких уплотнениях. Математическая модель позволяет оценить площадь взаимодействия конуса с грунтом, объём уплотняемого грунта, напряжения в контакте, вертикальную и горизонтальную силы, действующие на конус и на базовую машину.

2. Обоснован метод динамического расчета эффективности работы конусного устройства для уплотнения грунта, позволяющий учесть неравномерность нагружения конусного раскатчика и базовой машины.

3. Методика расчета устойчивости базового гусеничного экскаватора, работающего с новым технологическим оборудованием – конусным раскатчиком, учитывающая особенности формирования нагрузки от конусного раскатчика.

Практическая значимость заключается в создании нового рабочего органа, позволяющего эффективно уплотнять грунтовые основания под фундаментом промышленных и гражданских объектов, в разработке методики расчета и выбора основных его параметров. Методика расчета конструкции конусного рабочего органа используется в курсовом и дипломном проектировании студентами и магистрантами кафедры «Колесных и гусеничных машин» ЮУрГУ.

На основе результатов исследований и анализа существующих конструкций предложены технические решения, защищенные патентами на полезные модели № 199875 «Устройство для глубокого уплотнения грунтов», и № 189914 «Устройство для прессования труб в радиальном направлении», которые позволяют повысить эффективность и уменьшить энергоёмкость при раскатке скважин, а также при изготовления бетонных труб. Изготовление конусного устройства возможно не только на машиностроительных заводах, но и в ремонтно-механических строительных организациях.

На защиту выносятся. Положения научной новизны, практической значимости, результаты экспериментальных исследований, рекомендации по проектированию конусного устройства.

1. Математическая модель статического взаимодействия конусного устройства с грунтом при глубоких уплотнениях;

2. Метод динамического расчета эффективности работы конусного устройства для уплотнения грунта;

3. Методика расчета устойчивости базового гусеничного экскаватора, работающего с новым технологическим оборудованием – конусным раскатчиком;

4. Методика расчета и выбора основных параметров конусного раскатчика на базе гусеничного экскаватора;

5. Патенты на полезные модели № 199875 «Устройство для глубокого уплотнения грунтов» от 24.09.2020 г., № 189914 «Устройство для прессования труб в радиальном направлении» от 11.06.2019 г.

Методика исследований основана на анализе системы «базовая машина, рабочее оборудование в виде конусного раскатчика и уплотняемый грунт», на использовании математической модели взаимодействия конусного раскатчика с уплотняемым грунтом.

Оценка достоверности аналитического исследования обоснована экспериментальной проверкой конечных результатов.

Достоверность результатов. Верификация научных положений диссертации подтверждена экспериментальными исследованиями. Расхождение результатов математического моделирования и лабораторных испытаний не превышает 7–10%.

Реализация. Разработанная методика расчета и проектирования нового рабочего органа в виде конусного раскатчика для глубокого уплотнения просядочных грунтов и другие результаты исследования используются в строительной фирме ООО «Дилшод-Н» города Душанбе, в заводе «ДСТ-Урал» а также при подготовке бакалавров, специалистов и магистров на транспортном факультете ТТУ им. М.С. Осими, г. Душанбе и автотранспортном факультете ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научно-техническом совете при Министерстве дорожного хозяйства и транспорта Челябинской области (Челябинск, 2017), на выставке «ТЕХНОЭКСПО» (Челябинск, 2017 – 2019), , на десятой научной конференции аспирантов, докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2018), на международной научно-практической конференции аспирантов, докторантов и молодых учений «Мухандис-2019» (Душанбе, 2019), на международной научно-практической конференции «Пром-Инжинеринг-2019 –2020» (Челябинск, 2019 –2020), на выставке НТТМ-2019 «Евразийские ворота Шаг в будущее» (Челябинск, 2019).

Публикация. По теме работы опубликовано 11 печатных статей, в том числе 4 статьи опубликованы в научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ, 3 в сборниках российских и международных конференций РИНЦ, 2 статья в научном журнале, включенном в перечень база данных SCOPUS и 2 патента РФ на полезную модель. Основные публикации приведены в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключительных выводов, списка литературы и приложений. Объем работы составляет в целом 136 страницы машинописного тек-

ста, включая 90 рисунков, 13 таблицы, список литературы из 123 наименований и 3 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы, определены цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено состояние вопроса механизации глубинного уплотнения грунта. Проведён анализ отечественных и зарубежных литературных источников по существующим методам исследования рабочего органа для глубинного уплотнения и для трамбования грунтов. Проанализированы достоинства и недостатки широко используемого оборудования для глубокого уплотнения грунта и установлено, что:

- механизмы для глубинного уплотнения запрессовывают воздух внутрь уплотняемого грунта, что способствует в дальнейшем достаточно быстрому разрушению уплотненного ранее грунта;

- более эффективным способом глубинного уплотнения грунта является использование механизмов, обеспечивающих зазор между скважиной и рабочим органом, создающий благоприятные условия для выхода воздуха из уплотняемого грунта.

Исследователями Южно-уральского государственного университета предложено устройства для раскатки скважин и котлованов, сочетающее в себе преимущества известных технических решений и сводящее к минимуму перечисленные выше недостатки. Данное устройство защищено патентом на полезную модель № 161212 от 10.04.2016 г (рисунок 1).

Рабочий орган (рисунок 1) содержит конусообразную оболочку (корпус) 1, коленчатый вал 2, подшипниковые опоры 3 и 4, противовес 5.

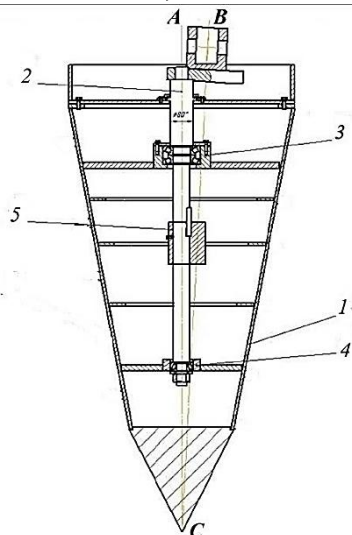


рисунок 1. конусный раскатчик.

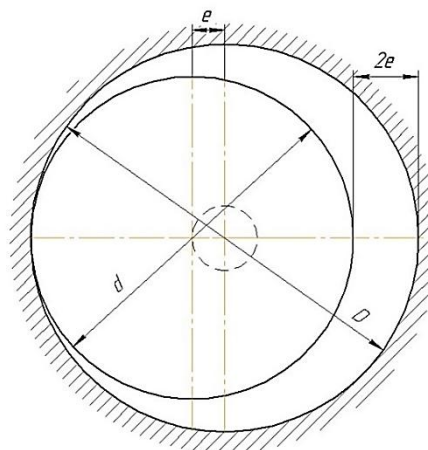


Рисунок 2. Схема раскатки котлована (вид сверху)

Особенностью предлагаемой конструкции является требование: ось вращения гидравлического двигателя (А) пересекается с осью коленчатого

вала (В) на вершине конуса (С). В этом случае предотвращается рыскание вершины конуса во время работы устройства и обеспечивается перемещение конуса в пространстве строго по вертикали.

Предельный зазор между корпусом раскатчика и стенкой котлована (рисунок 2) равен: $D-d=2e$, где d – диаметр раскатчика, D – диаметр котлована, e – эксцентриситет коленчатого вала.

Однако процесс взаимодействия конусного раскатчика с грунтом глубоко не изучен, поэтому данная диссертационная работа актуально и посвящена разработке теории расчета и проектирования новой эффективной конструкции конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунтовых оснований автомобильных дорог, промышленных и гражданских объектов на базе промышленного гусеничного экскаватора.

Во второй главе «Методика расчета нового рабочего органа гусеничного экскаватора при взаимодействии с грунтом» приведены: – кинематическое исследование конусного раскатчика с целью установления зависимости величины линейной скорости; – математическая модель процесса статического взаимодействия конусного устройства с грунтом при образовании скважины; – динамический силовой расчет; – результаты теоретических исследований.

Кинематическое исследование конусного раскатчика.

Кинематические исследования проводятся с целью установления величины линейной скорости конусного раскатчика и передаточного отношения механизма. Для проведения исследований определены геометрические параметры конусного раскатчика (рисунок 3).

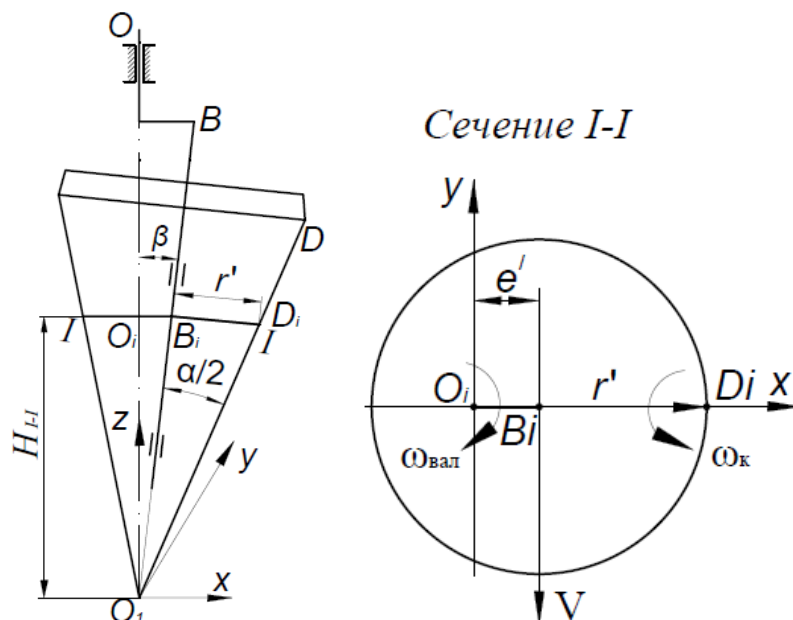


Рисунок 3. - Кинематическая схема к определению линейной скорости точки D_i эксцентрикового вала

Скорость вращения оси конуса определяется по формуле

$$V = \omega_{вал} \cdot e' = r' \cdot \omega_к, \quad (1)$$

где $\omega_{вал}$ – угловая скорость коленчатого вала; p/c , e' – эксцентриситет коленчатого вала в произвольном сечении $I-I$, мм; r' – радиус конуса, мм; ω_k – угловая скорость конуса, p/c .

Угловая скорость эксцентрикового вала $O_1 B$ определена по формуле

$$\omega_{вал} = \frac{V}{e'}. \quad (2)$$

Угловая скорость конуса определена по формуле

$$\omega_k = \frac{V}{r'}. \quad (3)$$

Зависимость передаточного отношения эксцентрикового вала и конуса в конечном итоге определяется углом конуса и углом нутации коленчатого вала:

$$i_{кон}^{вал} = \frac{\omega_{вал}}{\omega_k} = \frac{H_{I-I} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{H_{I-I} \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \beta} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg} \beta \cdot \cos \beta} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\sin \beta}. \quad (4)$$

Математическая модель процесса статического взаимодействия конусного раскатчика с грунтом.

Исследование процесса взаимодействия конусного устройства с грунтом при образовании скважины осуществлено численным методом в среде программирования VisSim.

В программе в соответствии с зависимостями (5) и (6) заданы геометрические параметры сечения контакта механизма и образующей скважины при уплотнении грунта по линии AB (рисунок 4).

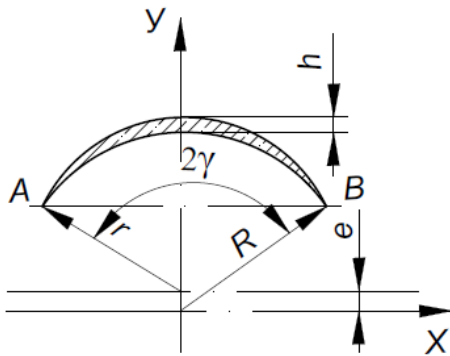


Рисунок 4. Геометрия среднего сечения конуса

$$y_R = \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (5)$$

$$y_r = e + \sqrt{r^2 - x^2}. \quad (6)$$

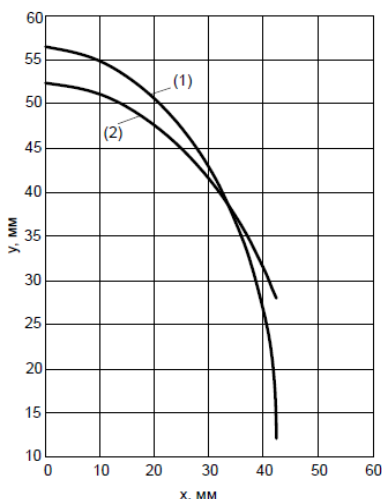


Рисунок 5. Зависимость геометрии среднего сечения конуса от координаты x

Площадь между линиями (1) и (2) на рисунке 5 – это площадь в среднем сечении конуса. При $x=35$ мм, эта площадь достигает максимума, является правой границей интегрирования, соответствует точки B с рисунка 4.

Далее определены: зависимость площади внедрения в среднем сечении конуса h , зависимость половина угла охвата в среднем сечении конуса γ , зависимость среднее перемещение грунта в среднем се-

чении конуса h_{cp} , зависимость части площади боковой поверхности конуса $S_{бок}^{часть}$ и зависимость объема вытеснения грунта контактной поверхностью конуса V .

Часть площади боковой поверхности конуса зависит от площади боковой поверхности конуса (11), половины угла охвата и числа π .

Площадь боковой поверхности конуса определяется по формуле

$$S_{бок} = \pi \cdot r \cdot L, \quad (7)$$

где $L = \sqrt{H^2 + R^2}$ – длина ребра конуса.

По рисунку 6 при $x=35$ мм, часть площади боковой поверхности конуса равна $S_{бок}^{часть} = 12200$ мм²

Далее, зная зависимость части площади боковой поверхности конуса и напряжение на контактной поверхности конуса, определены суммарная сила контактной поверхности конуса (8), сила при кручении (9), вертикальная сила (10) и крутящий момент конуса при внедрении в грунт (11) (рисунок 7).

$$P_{\Sigma} = \tau \cdot S_{бок}^{часть}, \quad (8)$$

где $S_{бок}^{часть}$ – часть площади боковой поверхности конуса, м²; $\tau = C \cdot x^{\mu}$ – на-

пряжение на контактной поверхности конуса согласно теории Н.И Наумца, Н/м²; где C – коэффициент общей деформации уплотняемого грунта, Н/м³; μ – показатель степени, характеризующий процесс деформации; $x = r + e$ – деформация радиуса скважины.

$$P_{кр} = P_{\Sigma} \cdot f_{тр}, \quad (9)$$

$f_{тр}$ – коэффициент трения грунта по стали.

$$P_{верт} = P_{\Sigma} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (10)$$

$$M_c = P_{кр} \cdot r_{\frac{2}{3}}, \quad (11)$$

$r_{2/3}$ – радиус 2/3 конуса, соответствующий среднему сечению, м.

Осевое усилие при внедрении конуса определяется из формулы:

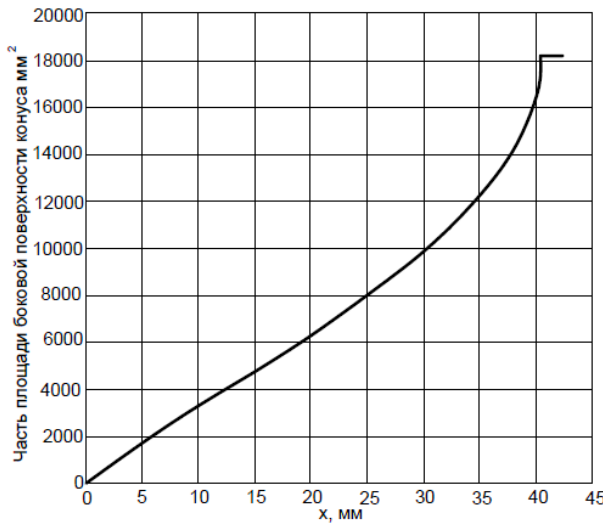


Рисунок 6. Зависимость части площади боковой поверхности конуса от координаты x

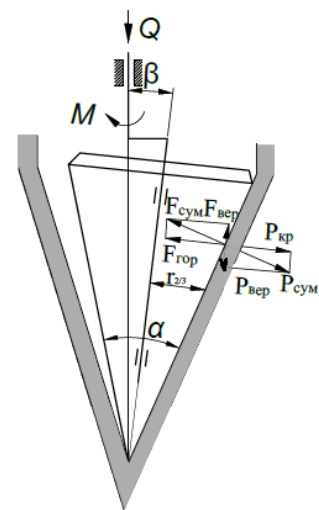


Рисунок 7. Расчетная схема приложение сил

$$P = \frac{\frac{Q}{2}}{\sin\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right)}. \quad (12)$$

Отсюда

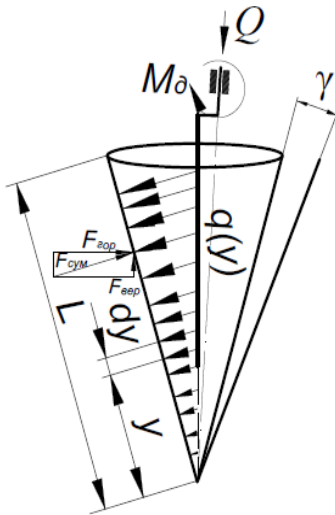
$$Q = 2 \cdot P_{кр} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right),$$

где $P_{кр}$ – сила конусного раскатчика на грунт при кручении, Н.

Динамический силовой расчет.

Для определения динамической зависимости разработан метод оценки динамических характеристик для конусного устройства (рисунок 8). Требуемый крутящий момент и мощность привода раскатчика определён по формулам:

$$M_{\partial} = \int_0^L S(y) y dy = \frac{8Q}{9\pi} \sqrt{\frac{2Q(1-\sigma^2)}{\pi C} \frac{1}{L \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} = 0,226 \cdot Q^{1,5} \sqrt{\frac{1-\sigma^2 \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{C L}}, \quad (13)$$



где Q – осевое усилие, приложенная к вертикальной оси водилу, Н, σ - коэффициент Пуассона.

$$N = M_{\partial} \cdot \omega_{к}, \quad (14)$$

где $\omega_{к}$ - угловая скорость конусного устройства р/сек.

Угловая скорость вращения конусного устройства (15) зависит от угловой скорости эксцентрикового вала (2) и передаточного отношения между валом и конусом (4)

$$\omega_{к} = \frac{\omega_{\text{вал}}}{i_{\text{кон}}}. \quad (15)$$

Рисунок 8. Расчетная схема приложения распределённых сил

Результаты теоретических исследований.

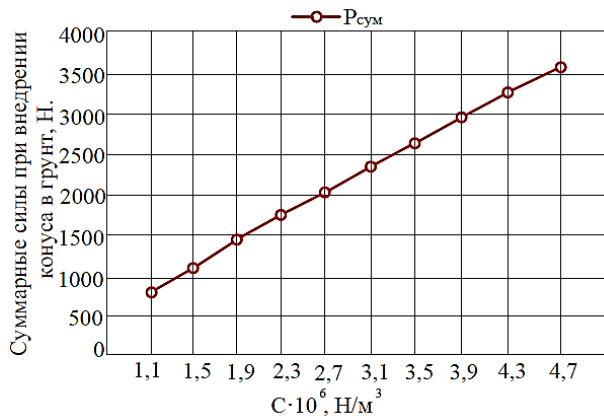


Рисунок 9. Зависимость суммарной силы от коэффициента С

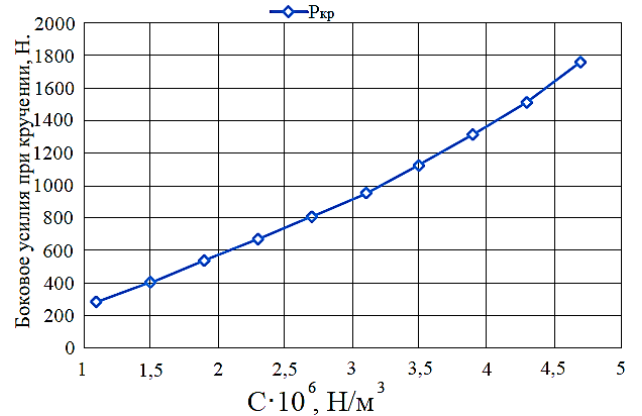


Рисунок 10. Зависимость бокового усилия при кручении от коэффициента С при коэффициенте трения грунта по стали $f_{тр} = 0.4$

В результате статических исследований конусного устройства определено влияние разных грунтов на суммарные силы при внедрении конуса в грунт (рисунок 9), на боковое усилие при кручении (рисунок 10) и крутящий момент (рисунок 11, график M_C).

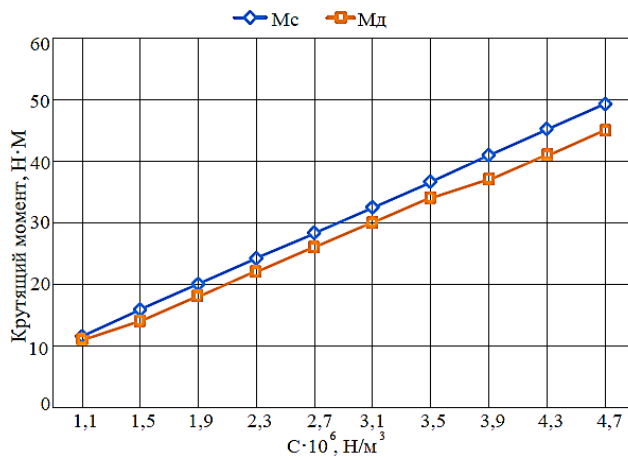


Рисунок 11. Зависимость крутящего момента от коэффициента C по статической и динамической моделям

уплотнения грунта» приведены результаты экспериментальных исследований,

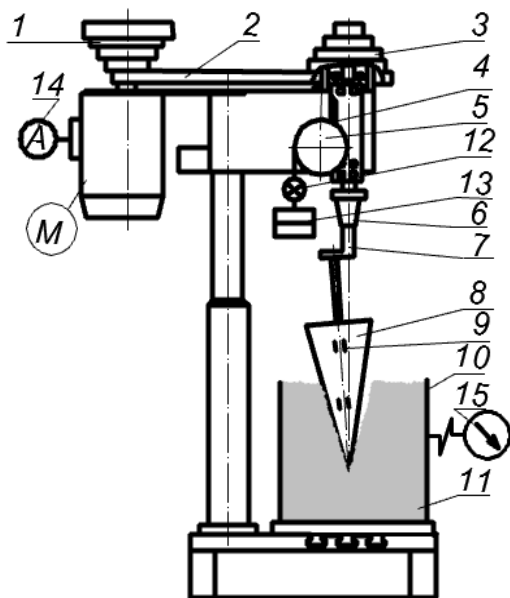


Рисунок 12. Схема экспериментального стенда

M – Электродвигатель, 1– шкив, 2– ремень, 3– шкив, 4– рейка, 5– механизм подачи, 6– шпиндель, 7– эксцентриковый вал, 8– рабочий орган в виде конусной оболочки, 9– подшипниковые опоры, 10– форма разборная, 11– уплотняемый материал, 12– динамометр на растяжения, 13– груз, 14– амперметр, 15– динамометр на сжатия

В результате динамических исследований также установлено зависимость крутящего момента от разных грунтов (рисунок 11, график M_D).

На рисунке 11 проведено сравнение методов статического и динамического взаимодействия конусного раскатчика с грунтом, которое выявило различие по крутящему моменту конусного раскатчика в пределах 5–10%.

В третьей главе «Экспериментальные исследования работы конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунта» приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение достоверности зависимостей, полученных теоретическими путем. Испытания проводились в лаборатории Строительно-дорожные и специальные машины кафедры «Колесные и гусеничные машины» ЮУрГУ на специальном стендовом оборудовании, оснащённом измерительными приборами (рисунок 12). Основной объём экспериментальных исследований выполнен на модели конусного рабочего органа диаметром 0,105 м и углом при вершине конуса 24° . Исследование проводилось в искусственных грунтовых условиях с разрушенной структурой.

В ходе экспериментальных исследований обеспечивалось моделирование процесса погружения конусного рабочего органа в грунт с различными физико-механическими свойствами под действием разных осевых усилиях, с измерением пара-

метров, необходимых для фиксации информации о мощности, крутящем моменте, а также боковом усилии при кручении в процессе взаимодействия экспериментальной модели конусного рабочего органа с грунтом.

По результатам выполненных экспериментальных исследований полученные данные обрабатывались методами математической статистики и сравнивались с теоретическими исследованиями.

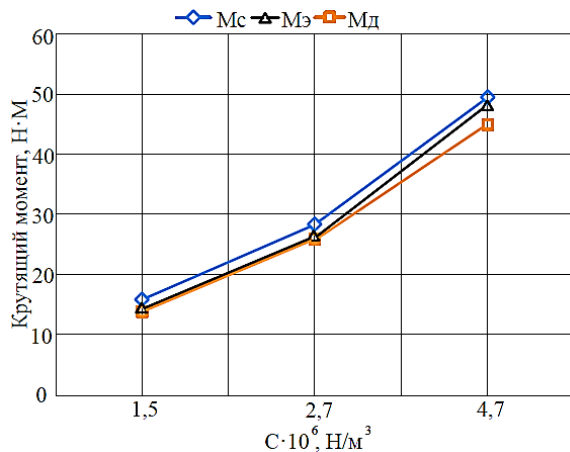


Рисунок 13. Зависимость крутящего момента конусного устройства от коэффициента общей деформации грунта C

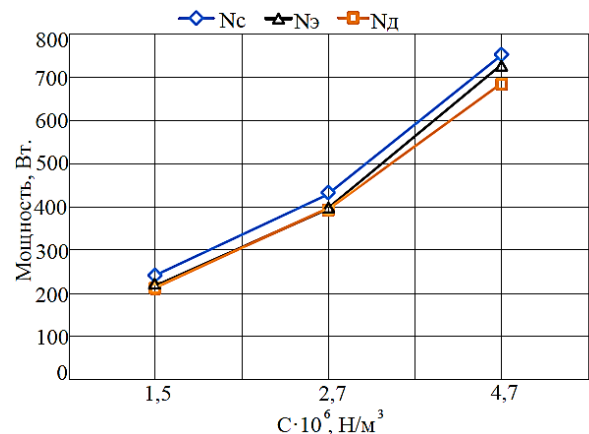


Рисунок 14. Зависимость мощности конусного устройства от коэффициента общей деформации грунта C , при угловой скорости $\omega_1=15.2 \text{ р/с}$.

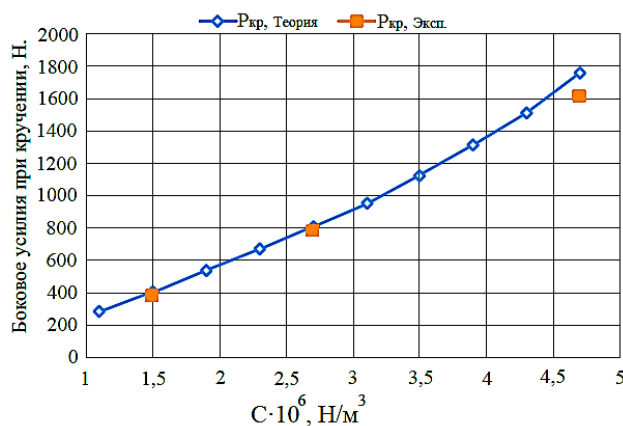


Рисунок 15. Зависимость бокового усилия при кручении от коэффициента общей деформации грунта при коэффициенте трения $f_{тр}=0.4$. На рисунке 15 представлены зависимости бокового усилий при кручении от коэффициента общей деформации грунта при коэффициенте трения $f_{тр}=0.4$, полученные в результате экспериментальных и расчетных исследований.

В четвертой главе представлены методика расчета устойчивости экскаватора как базовой машины, для конусного раскатчика и технические решения, сделанные на базе диссертационных исследований.

Новый рабочий орган, исследованный в диссертации, может быть установлен на любую базовую машину, применяющуюся в строительстве: на промышленный гусеничный или колесный трактор, экскаватор, буровые машины и др. В качестве базовой машины для конусного раскатчика в данном исследовании взят одноковшовый гусеничный экскаватор.

Навесное оборудование в виде конусного раскатчика существенно изменяет направления приложения нагрузки и его величину. Что делает невозможным применение методики оценки устойчивости экскаватора, работающего с ковшом, к экскаватору с конусным раскатчиком.

В первую очередь это связано с тем, что изменяется положение ребра опрокидывания: если в традиционном экскаваторе с ковшом – это передний опорный каток гусеницы, то в случае конусного раскатчика – это задний опорный каток (точка А, рисунок 16. а,б). Расчет проведен для двух положений экскаватора (продольного а) и поперечного б) рисунок 16) относительно раскатываемых скважин.

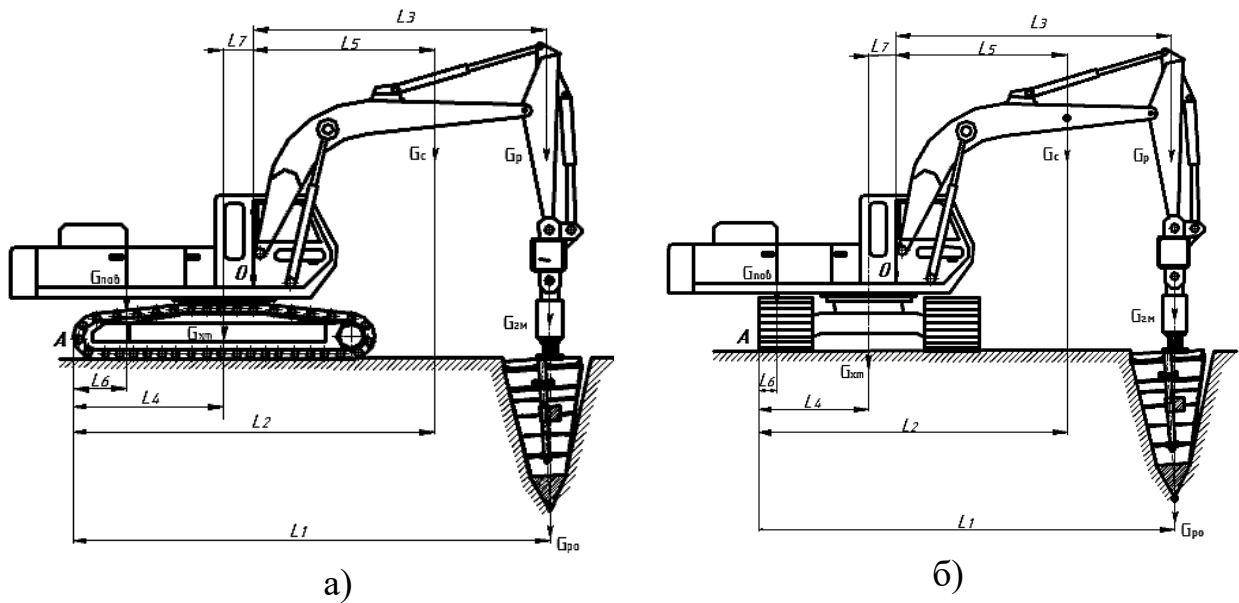


Рисунок 16. Расчетная схема работы экскаватора с конусным раскатчиком
а) продольное положение, б) поперечное положение

Расчет устойчивости основан на условии, что экскаватор должен осуществлять максимальное усилие на рабочем органе при внедрении в грунт строго по вертикальному направлению.

Коэффициент устойчивости экскаватора определен как отношение момента устойчивости (20) M_y к моменту опрокидывания (21) M_o , ребро опрокидывания определяется точкой А (рисунок 17).

$$M_y = G_{нов} \cdot L_6 + G_{зм} \cdot L + G_c \cdot L_2 + G_p \cdot L_1 \quad (20)$$

$$M_o = Q \cdot L_1 \quad (21)$$

Таким образом, рассматриваемая конструкция экскаватора имеет коэффициент устойчивости (22) $K_y \geq 1,15$, что удовлетворяет требованиям устойчивости

$$а) K_y = \frac{M_y}{M_o} = \frac{401,7}{190,5} \approx 2,10 \geq 1,15, \quad б) K_y = \frac{290,3}{177,5} = 1,63 \geq 1,15 \quad (22)$$

Определение рациональной величины угла конуса

Для выявления оптимального значения угла конуса проведено исследование функции объема вытесняемого грунта от угла конуса $V(\alpha)$ и осевого усилия от угла конуса $Q(\alpha)$.

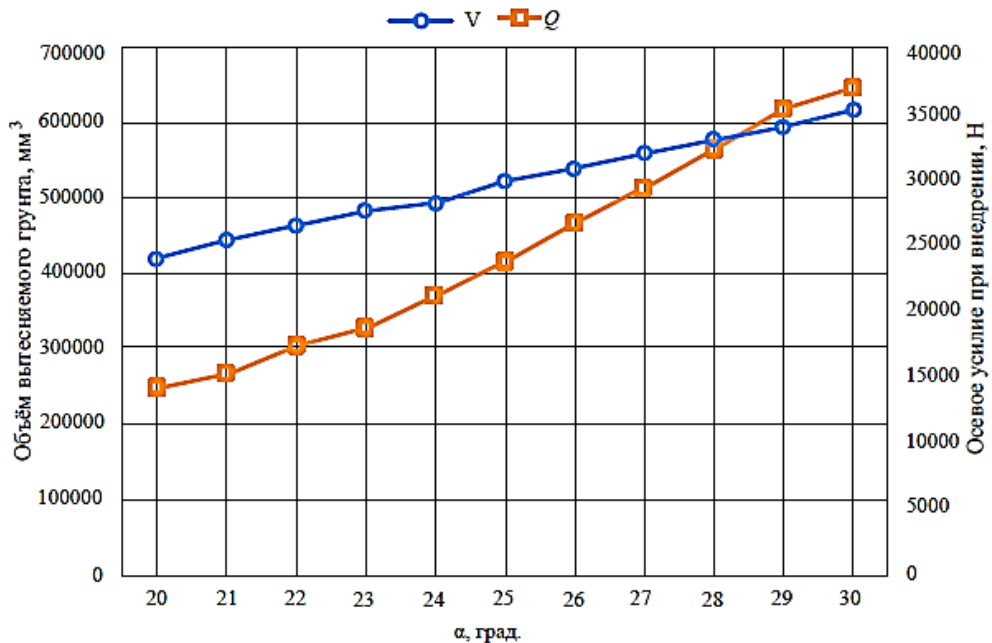


Рисунок 17. Зависимость значения функции $V(\alpha)$ и $Q(\alpha)$.

Исследование проведено численным методом на примере промышленного образца. Результаты приведены на рисунке 17.

Анализ графиков показал:

– функция $V(\alpha)$ имеет монотонный вид с тенденцией роста $\frac{dV}{d\alpha} = 1981 \frac{\text{мм}^3}{\text{град}}$.

– функция $Q(\alpha)$ имеет перелом тенденции. В диапазоне $20-24^\circ$ прирост составляет $\frac{dQ}{d\alpha} = 1743 \frac{\text{Н}}{\text{град}}$, а в диапазоне $24-30^\circ$ $\frac{dQ}{d\alpha} = 2632 \frac{\text{Н}}{\text{град}}$. Исходя из вышеизложенного 24° является оптимальным углом конуса.

Определение производительности конусного раскатчика.

Угловая скорость вращения конуса определена по формуле:

$$\omega_{\text{кон}} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{6,8}{6,28} = 1,08 \text{ об/сек} \quad (23)$$

Скорость вертикального перемещения конусного раскатчика определена по формуле:

$$V_{\text{вер}} = h_{\text{вер}} \cdot \omega_{\text{кон}} = 10,8 \frac{\text{мм}}{\text{об}} \cdot 1,08 \frac{\text{об}}{\text{с}} = 11,66 \frac{\text{мм}}{\text{с}} \quad (24)$$

То есть при внедрении конуса со скоростью 10,8 мм/об и угловой скорости вращения конуса 1,08 об/сек, скорость вертикального перемещения составляет 11,66 мм/сек.

При глубине скважины 4000 мм – время раскатки одной скважины составляет

$$t_{pac} = \frac{H}{V_{сер}} = \frac{4000}{11,66} = 343 \text{ сек} = 5,7 \text{ мин.} \quad (25)$$

С учетом извлечения конуса из скважины и перемещения стрелы экскаватора для раскатки следующей скважины – время технологического процесса изготовления одной скважины составляет $T_{ц} = 12-14$ минут.

Таким образом, сменная технологическая производительность (8 ч) нового рабочего органа (конусного раскатчика) составляет:

$$P_c = \frac{8 \cdot 60}{T_{ц}} = 34 - 40 \text{ скважин.} \quad (26)$$

Из первоисточников известна, что затрачиваемое время на прокладку одной скважины составляет 15-17 минут, что на 20-25% больше, чем у предлагаемой конструкции.

Технические решение, сделанные на базе диссертационных исследований, защищены патентами на полезные модели № 199875 «Устройство для глубокого уплотнения грунтов», и № 189914 «Устройство для прессования труб в радиальном направлении», которые позволяют повысить эффективность и уменьшить энергоёмкость при раскатке скважин, а также при изготовления бетонных труб.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Внедрение нового оборудования гусеничного экскаватора для глубокого уплотнения грунта методом образования скважины позволит увеличить производительность на 20-25% за счет сокращения времени технологического цикла с 15-17 минут до 12-14 минут на одну скважину.

2. Разработана математическая модель процесса взаимодействия конусного устройства с грунтом с использованием среды программирования VisSim. Разработанная математическая модель является оригинальной, поскольку модели, имеющиеся в литературе, описывают другие механизмы для уплотнения грунта: агрегат для глубинного трамбования грунта, многокатковый винтовой раскатчик, спиралевидный снаряд для продавливания скважин.

3. Разработан метод определения динамических характеристик конусно-гоустройства и выведены расчетные формулы для опрокидывающего и крутящего моментов, которые нужно приложить к водилу для его вращения при уплотнении грунтов различных характеристик по показателю коэффициента общей деформации и коэффициенту Пуассона.

4. Выбран критерий выбора рационального угла конуса по соотношению интенсивностей нарастания объема вытесняемого грунта и осевого усилия, приложенного стрелой экскаватора. Интенсивность нарастания объема вытесняемого грунта монотонна во всем диапазоне и равна $1981 \text{ мм}^3/\text{град.}$, а интенсивность нарастания осевого усилия имеет перелом: в диапазоне $20-24^0$ прирост составляет 1743 Н/град. , а в диапазоне $24-30^0$ – 2632 Н/град. Определен оптимальный угол конуса, равный 24^0 .

5. Разработана методика расчета устойчивости экскаватора, оборудованного новым рабочим оборудованием – конусным раскатчиком. Коэффициент устойчивости экскаватора с конусным раскатчиком при продольном положении $K_u=2,10$, при поперечном положении $K_u=1,63$, удовлетворяющий требованиям технических условий.

6. Зависимость бокового усилия при кручении, определенная по математической модели, подтверждена экспериментальным исследованием для трех разных грунтов. Сравнения показали, что максимальное расхождение данных при коэффициенте общей деформации грунта $C=4.7 \cdot 10^6$ Н/м³, составляет 152 Н., что в процентном отношении не превышает 10%.

7. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показали, что максимальное расхождение по крутящему моменту при $C=4.7 \cdot 10^6$ Н/м³ и не превышает 7 %, а по мощности при $C=1.5 \cdot 10^6$ Н/м³ не превышает 10 %.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Разработанные методики и алгоритмы расчета конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунта в дальнейшем планируется применять для исследования комбинированного трёхконусного раскатчика, который, предположительно будет иметь лучшие показатели по вибрации и уравновешенности.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Кромский Е.И., Кондаков С.В., Тиллоев К.З. Конусный раскатчик к гусеничному экскаватору. «Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: машиностроение 2018. №1 (18). С. 34-39. [DOI: 10.14529/engin180104](https://doi.org/10.14529/engin180104)»

2. Тиллоев, К.З. Математическая модель процесса работы конусного раскатчика / К.З. Тиллоев // Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 60–67. [DOI: 10.14529/engin190307](https://doi.org/10.14529/engin190307)

3. Тиллоев К.З., Кромский Е.И., Кондаков С.В. Выбор рациональных параметров конусного раскатчика для глубокого уплотнения оснований дорог// Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №1. С. 82-89. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-82-89

4. Тиллоев К. З., Кондаков С. В., Асфандияров М. А. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса глубокого уплотнения грунта конусным раскатчиком // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 3. С. 60–70. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-60-70

В изданиях, входящих в базу данных Scopus и Web of Science

5. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. (2020) Promising Machine for Compacting Road-Building Materials. Proceedings of the 5th International Confer-

ence on Industrial Engineering (ICIE 2019). Vol. 1. – P. 21–28. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_3.

6. Kromsky E.I., **Tilloev K.Z.**, Muhiddinzoda K.J. (2021) New Mechanism for Composite Materials Compaction. Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Vol. 1. – P. 173–180. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_21.

В других изданиях

7. Кромский Е.И., Кондаков С.В., **Тиллоев К.З.**, Кадырова Х.И. Новое сменное оборудование гидравлического экскаватора. «Политехник Вестник. Серия: Инженерные исследования. №3 2018 – С. 50-54» <https://elibrary.ru/item.asp?id=36533019>

8. **Тиллоев К.З.**, Файзов С.Х. Обзор и анализ конструкции машин для глубокого уплотнения грунта. «Материалы десятой научной конференции аспирантов и докторантов Южно-Уральский государственный университет 2018. С. 60-65.» <https://elibrary.ru/item.asp?id=35313497>

9. **Тиллоев К.З.** Новое оборудование для уплотнения грунтов. Сборник международная научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (Мухандис - 2019) – Душанбе-2019 С. 222-227.

Патенты на полезную модель

10. Пат. № 199875 Российская Федерация. Устройство для глубокого уплотнения грунтов / Е.И. Кромский, С.В. Кондаков, К.А. Гундарев, **К.З. Тиллоев**, М.А. Асфандияров заявитель и патентообладатель Е.И. Кромский, С.В. Кондаков, К.А. Гундарев, К.З. Тиллоев, М.А. Асфандияров № 2020109847 заявл. 05.03.2020; опубл. 24.09.2020.

11. Пат. № 189914 Российская Федерация. Устройство для прессования труб в радиальном направлении/ Е.И. Кромский, С.В. Кондаков, **К.З. Тиллоев** заявитель и патентообладатель Е.И. Кромский, С.В. Кондаков, К.З. Тиллоев № 2019104330 заявл. 15.02.2019; опубл. 11.06.2019.