



Научная статья
УДК 624.132.3 + 625.7.08.002.5
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-196-208>
EDN: FQDNQR



КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГЛУБОКОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

К.А. Гундарев , С.В. Кондаков, А.В. Подзерко, М.А. Асфандияров, И.Е. Левшин
Южно-Уральский государственный университет,
г. Челябинск, Россия
 ответственный автор
pioneer03.95@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Разрушение покрытий автомобильных дорог и гидротехнических сооружений часто происходит из-за недостаточного уплотнения насыпных грунтов ввиду послойного уплотнения на малую глубину. Решение этой проблемы требует совершенствования технологии и оборудования для равномерного уплотнения грунтов на глубину, независимую от толщины насыпного слоя. Целью данного исследования является определение передаточного отношения нового устройства для глубокого уплотнения грунтов, разработанного соавторами.

Материалы и методы. В работе используются методы математического моделирования нового устройства по кинематическим схемам для определения передаточного отношения. Рассмотрены кинематические схемы нового устройства с использованием трех конусных роликов, расположенных между водилом, эпициклом (уплотняемым грунтом) и забурником через равные углы. На основе анализа кинематических схем выявлена зависимость передаточного отношения устройства от угловых скоростей водила и конусного ролика. Определены угловые скорости и построена схема для определения радиусов водила и конусного ролика. Получена зависимость передаточного отношения нового устройства от его геометрических характеристик.

Результаты. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660077. Представлены фрагменты исходного кода программы для расчета передаточного отношения устройства на языке программирования Python. Результаты работы могут быть использованы инженерами и специалистами профильных предприятий, конструкторских бюро и инжиниринговых центров при расчете параметров аналогичных устройств. Практическое значение результатов исследования связано с усовершенствованием устройств глубокого уплотнения грунтов и повышением показателей эффективности дорожно-строительных машин.

Обсуждение и заключение. Ценность работы обусловлена полученным выражением для передаточного отношения нового устройства, обладающим научной новизной. Установленная связь между передаточным отношением, углом между осями конусных роликов и углом наклона образующей конусного ролика позволяет рассчитать крутящий момент на валу рассматриваемого механизма. Также представлен экспериментальный образец нового устройства с оптимальными геометрическими параметрами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: передаточное отношение, математическая модель, дорожно-строительные машины, раскатка котлованов, динамически-уравновешенная система, конусные ролики, водило, эпицикл, площадь контакта, глубокое уплотнение грунтов

Статья поступила в редакцию 21.12.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Гундарев К.А., Кондаков С.В., Подзерко А.В., Асфандияров М.А., Левшин И.Е. Кинематическое исследование нового устройства для глубокого уплотнения грунтов // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 196-208. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-196-208>

© Гундарев К.А., Кондаков С.В., Подзерко А.В., Асфандияров М.А., Левшин И.Е., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-196-208>

EDN: FQDNQR

KINEMATIC ANALYSIS OF NEW DESIGN OF DEEP SOIL COMPACTION EQUIPMENT

Kirill A. Gundarev ✉, Sergey V. Kondakov, Alexander V. Podzerko

Marat A. Asfandiyarov, Igor E. Levshin

South Ural State University,

Chelyabinsk, Russia

✉ corresponding author

pioneer03.95@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The destruction of road surfaces and hydraulic structures results from insufficient compaction of bulk soils due to layer-by-layer shallow compaction. There is a need to improve technology and equipment for uniform soil compaction at a depth irrelevant to the layer thickness. The purpose of this research is to determine the gear ratio for the new deep soil compaction device designed by the co-authors.

Materials and methods. Methods of mathematical modeling of the new design based on kinematic schemes for determining the gear ratio have been used. The article discusses the kinematic schemes of the new device with three conical rollers mounted between the carrier, the epicycle (compacted soil) and the drill bit at equal angles. According to the diagrams, the gear ratio is expressed by means of angular velocities of the carrier and the conical roller. As angular velocities are determined, the scheme is constructed to determine the radii of the carrier and the conical roller. The relations between the gear ratio of the new design and its geometric characteristics are obtained.

Results. The Certificate of state registration of the computer program No. 2025660077 has been received. Fragments of the source code of a program for calculating the gear ratio of a device in the Python programming language are presented. The applicability of the research results refers to calculating the torque and geometric parameters of similar devices at machine-building enterprises. The practical significance of the research results is related to the improved design of deep soil compaction equipment which increases the efficiency of road construction machinery.

Discussion and conclusion. The research novelty refers to the introduction of the gear ratio for the new device design. Relations between the gear ratio, the angle between the axes centers and the skew angle of the conical rollers make it possible to calculate the torque of such devices. An experimental model of the new device made according to optimal geometric parameters has been presented.

KEYWORDS: gear ratio; mathematical model; road construction machines; rolling out pits; dynamically balanced system; conical rollers; carrier; epicycle; contact area; deep soil compaction

The article was submitted: December 21, 2025; approved after reviewing: February 19, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Gundarev K.A., Kondakov S.V., Podzerko A.I.V., Asfandiyarov M.A., Levshin I.E. Kinematic analysis of new design of deep soil compaction equipment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 196-208. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-196-208>

© Gundarev Kirill A., Kondakov Sergey V., Podzerko Alexander V., Asfandiyarov Marat A., Levshin Igor E., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги и гидротехнические сооружения – это важная система экономического развития региона, страны и континента. Поддержание транспортной сети требует огромных финансовых и природных ресурсов, что способствует изменению климата. Около 10% выбросов парниковых газов приходится на строительство и обслуживание подобных инженерных сооружений [1].

Протяженность автомобильных дорог увеличилась на 12 млн км по всему миру с 2000 г. При этом ожидается, что к 2050 г. будет построено еще 25 млн км дорог, на что потребуется более 70 трлн долларов США [2]. Требование устойчивого развития заключается в снижении затрат на жизненный цикл дорожного покрытия и воздействия на окружающую среду для достижения экономической эффективности, углеродной нейтральности [3] и безопасности дорожного движения в ближайшем будущем [4].

Новые автомобильные дороги и гидротехнические сооружения улучшают логистику, повышение эффективности которой стало движущей силой и определяющим фактором эффективной интеграции в глобальные цепочки создания стоимости, поддержания экономического роста и повышения национальной конкурентоспособности [5].

В настоящее время при строительстве автомобильных дорог и гидротехнических сооружений (плотин, дамб, насыпей и прочих инженерных сооружений) на просадочных и насыпных грунтах всегда возникают сложности в период эксплуатации, вызванные проявлением неравномерных просадок и деформаций грунтового основания, что приводит к аварийным ситуациям и к невозможности эксплуатации данных сооружений. Для решения этих проблем необходимы дополнительные затраты от общей стоимости объекта, на что выделяются все большие суммы государственных и частных инвестиций [5].

Просадочные и насыпные грунты (пески, супеси, суглинки) характеризуются недостаточно высокой несущей способностью, повышенной сжимаемостью и влагонасыщением, ухудшением физико-механических свойств при увлажнении и достаточно низкой устойчивостью на сейсмической местности. Проблемы, возникающие при строительстве гидротехнических сооружений на просадочных и насыпных грунтах, могут быть решены новой технологией и оборудованием для уплотнения грунтов механическими способами.

Новое направление совершенствования дорожно-строительных и гидротехнических

машин с навесным оборудованием – это их оснащение устройством для глубокого уплотнения грунтов. Оказываемое им воздействие на грунт способствует увеличению несущей способности, повышению прочностных характеристик, уменьшению фильтрации воздуха в уплотняемом слое, что создает устойчивую структуру грунтового массива по всей глубине насыпного слоя уплотняемого грунта.

Существующие дорожно-строительные машины (катки, трамбовки, виброплиты и т.п.) при возведении насыпи из различных типов грунтов осуществляют послойное уплотнение таких формаций толщиной 0,3...0,8 м [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. При данном методе уплотнения определенная масса насыпного грунта уменьшается в объеме за счет удаления из его пор небольшой части воды и воздуха, а другая часть подвергается компрессионному сжатию в массиве грунта. В конечном итоге такой грунт приобретает недостаточную плотность в сравнении с требуемыми показателями, подвергается быстрому разрушению в период эксплуатации, вызывает провалы дорожного полотна с нарушением транспортного сообщения и разрушением земляных дамб. Все эти неблагоприятные ситуации несут колоссальный ущерб в финансовом и материальном плане.

Возникает необходимость в уменьшении числа таких ситуаций путем создания грунтовых массивов с улучшенными показателями плотности насыпных и просадочных грунтов. Решить сложившуюся проблему возможно технологией глубокого уплотнения грунтов, независимой от толщины слоя насыпного грунта.

Для уплотнения насыпных грунтов на большую глубину, достигающую нескольких метров (земляное полотно автомобильных дорог, гидротехнических сооружений и других насыпей высотой до 4–6 м), изучен опыт применения оборудования для уплотнения грунтов, внедренного в эксплуатацию.

Известны способы уплотнения грунтов с помощью конусных оболочек, внедряемых в грунт с помощью ударных импульсов [19] (рисунок 1) и методом раскатки [Патент № 1836527 Российская Федерация. Устройство для раскатки скважин в грунте / Л.М. Бобылев, А.Л. Бобылев // № 5000939/03; заявл. 12.07.1991; опубл. 23.08.1993, Бюл. № 31]. Известно устройство набивных свай с применением винтового рабочего органа [20]. Как показывают исследования ученых из г. Омска и г. Новосибирска, плотность грунта в результате глубинного уплотнения может быть повышена на 20–25%, а несущая способность в 1,5–2 раза.



Рисунок 1 – Агрегат с рабочим оборудованием для глубинного трамбования грунта [19]

Figure 1 – Unit with working equipment for deep soil compaction [19]

Относительными недостатками применяемых известных конструкций являются большая площадь контактной поверхности рабочего органа с грунтом, достигающая 6 м^2 , что требует установки гидромолотов большой мощности, а также динамическая неуравновешенность механической системы устройства для раскатки

котлованов [Патент № 161212 Российская Федерация. Устройство для раскатки котлованов / Е.И. Кромский, Д.Р. Каюпов, А.С. Гладченко // № 2015141387; заявл. 29.09.2015; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10] [21,22] и конусного раскатчика [24] с коленчатым валом и одним конусным роликом (рисунок 2).

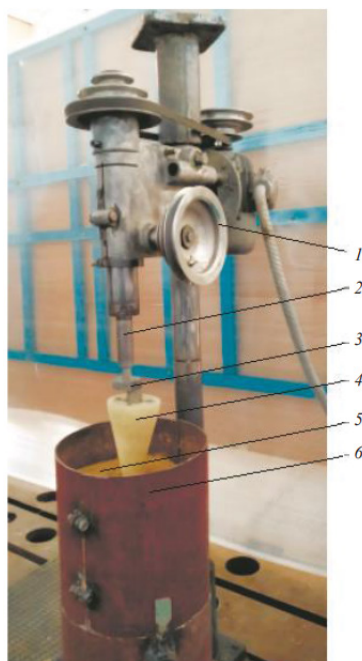


Рисунок 2 – Экспериментальный стенд: 1 – механизм подачи; 2 – привод; 3 – коленчатый вал; 4 – конусный раскатчик; 5 – уплотняемый грунт; 6 – разборная форма [23]
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Experimental stand: 1 – drive; 2 – feed mechanism; 3 – crankshaft; 4 – cone reamer; 5 – compacted soil; 6 – collapsible form [23]
Source: compiled by the authors.

Ученые Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (г. Челябинск) модернизировали устройство для раскатки котлованов, применив динамически-уравновешенную систему для устройства глубокого уплотнения грунтов [Патент № 199875 Российская Федерация. Устройство для глубокого уплотнения грунтов / Е.И. Кромский, С.В. Кондаков, К.А. Гундарев, К.З. Тиллоев, М.А. Асфандияров // № 2020109847; заявл. 05.03.2020; опубл. 24.09.2020, Бюл. № 27] в виде трех симметрично расположенных по окружности конусных роликов с возможностью уменьшения осевого усилия путем использования винтового шнека, жестко соединенного с забурником нового

устройства [Патент № 221102 Российская Федерация. Устройство для уменьшения осевого усилия при глубоком уплотнении грунтов / К.А. Гундарев // № 2023108118; заявл. 03.04.2023; опубл. 18.10.2023, Бюл. № 29].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторским коллективом проведены исследования кинематической схемы устройства для глубокого уплотнения грунтов [25], в результате которых определено передаточное отношение планетарного механизма устройства. Для этого рассмотрены схемы устройства (рисунки 3, 4) и проведено математическое моделирование [26, 27].

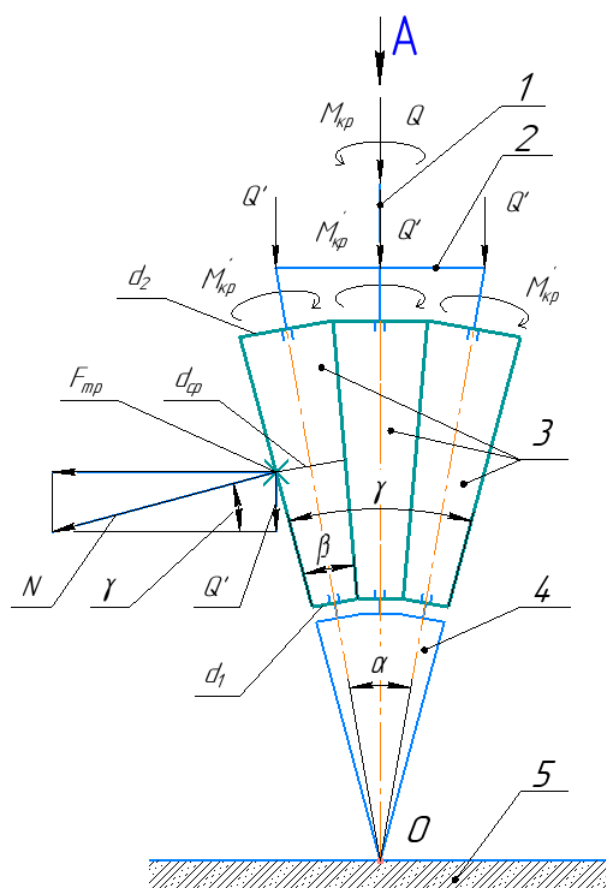


Рисунок 3 – Кинематическая схема нового устройства для глубокого уплотнения грунтов:
1 – вал приводной; 2 – водило; 3 – конусные ролики; 4 – забурник; 5 – грунтовое основание
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Kinematic scheme of the new device for deep soil compaction:
1 – drive shaft, 2 – carrier, 3 – cone rollers, 4 – trapper, 5 – ground base
Source: compiled by the authors.

Вид А

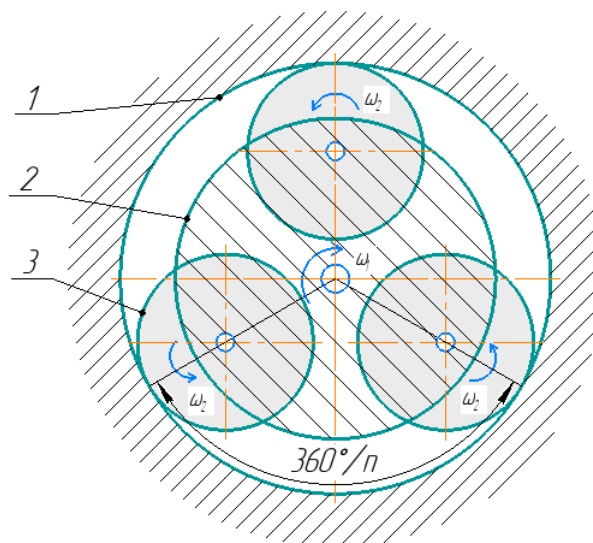


Рисунок 4 – Кинематическая схема нового устройства для глубокого уплотнения грунтов на виде сверху:
 1 – эпицикл; 2 – водило; 3 – конусный ролик; ω_1 – угловая скорость водила;
 ω_2 – угловая скорость одного конусного ролика; n – количество конусных роликов
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Kinematic scheme of the new device for deep soil compaction (top view):
 1 – epicycle; 2 – carrier; 3 – cone roller; ω_1 – angular speed of the carrier;
 ω_2 – angular speed of a cone roller; n – number of cone rollers
 Source: compiled by the authors.

Записано выражение для определения передаточного отношения устройства по схеме (см. рисунок 4):

$$i_{кр} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (1)$$

где ω_1 – угловая скорость водила, c^{-1} ;
 ω_2 – угловая скорость одного конусного ролика, c^{-1} .

Для определения угловых скоростей конусного ролика и водила составлена следующая схема (рисунок 5).

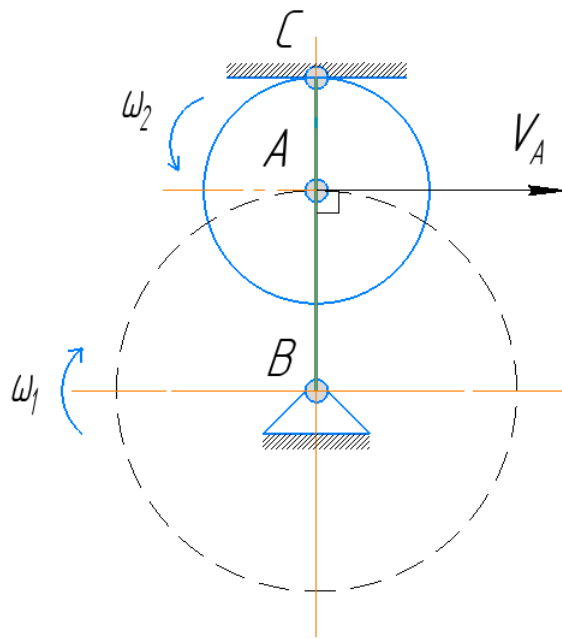


Рисунок 5 – Схема для определения угловых скоростей нового устройства:
 ω_1 – угловая скорость водила; ω_2 – угловая скорость конусного ролика; V_A – абсолютная скорость точки A;
 B, C – точки, принадлежащие водилу и конусному ролику соответственно;
 A – точка, принадлежащая водилу и конусному ролику одновременно
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Scheme for determining the angular speeds of the new device:
 ω_1 – angular speed of the carrier; ω_2 – angular speed of a cone roller; V_A – absolute speed of point A;
 B, C – points belonging to the carrier and the cone roller, respectively;
 A – points belonging both to the carrier and the cone roller
 Source: compiled by the authors.

Записана система уравнений для определения абсолютной скорости точки A относительно точек B и C:

$$\begin{cases} \vec{V}_A \perp AB; V_A = \omega_1 \cdot AB; \\ \vec{V}_A \perp AC; V_A = \omega_2 \cdot AC, \end{cases} \quad (2)$$

где \vec{V}_A – абсолютная скорость точки A, м/с;
 AB – расстояние, равное радиусу водила r_g' , т.е. $AB = r_g'$, м;
 AC – расстояние, равное радиусу конусного ролика r_k' , т.е. $AC = r_k'$, м.

Выражена угловая скорость водила ω_1 из (2) и получено следующее выражение:

$$\omega_1 = \frac{V_A}{AB} = \frac{V_A}{r_g'} \quad (3)$$

где r_g' – радиус водила, равный расстоянию AB, м.

Выражена угловая скорость конусного ролика ω_2 из (2) и получено следующее выражение:

$$\omega_2 = \frac{V_A}{AC} = \frac{V_A}{r_k'} \quad (4)$$

где r_k' – радиус конусного ролика в произвольном сечении, равный расстоянию AC, м.

В формулу (1) подставлены данные из формул (3) и (4) и получено выражение

$$i_{кр} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{V_A \cdot r_k'}{r_g' \cdot V_A} = \frac{r_k'}{r_g'} = \frac{AC}{AB} \quad (5)$$

Для определения радиусов водила и конусного ролика построена следующая расчетная схема (рисунок 6).

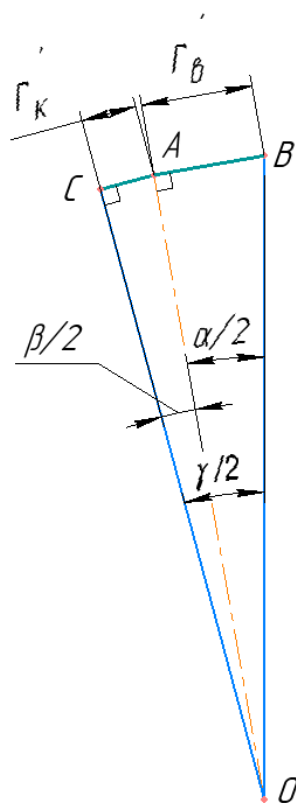


Рисунок 6 – Схема для определения радиусов водила и конусного ролика: r'_3 – радиус эпицикла; r'_6 – радиус водила; r'_k – радиус конусного ролика; α – угол между центром устройства и осью конусного ролика; β – угол наклона образующих конусного ролика; γ – угол, учитывающий угол α и половину угла β и обозначающий половину угла всего устройства; O – точка пересечения осей и образующих конусных роликов, обозначающая также вершину забурника; A, B, C – вершины углов
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Scheme for determining the radii of the carrier and the cone roller: r'_3 – epicycle radius; r'_6 – carrier radius; r'_k – cone roller radius; α – angle between the center of the device and the axis of the cone roller; β – angle of inclination of the cone roller elements; γ – half of the angle of the entire device, angle α and half of angle β being taken into account; O – the point of intersection of the axes and the cone rollers, which also refers to the top of the drill bit; A, B, C – vertices of corners
 Source: compiled by the authors.

Для определения радиуса водила на схеме (см. рисунок 6) рассмотрен треугольник AOB . Для этого определено значение острого угла $\alpha/2$ по формуле

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{AB}{OB}, \quad (6)$$

где α – угол между центром устройства и осью конусного ролика, град.;

AB – катет, равный величине радиуса водила, $AB = r'_b$, м;

OB , – гипотенуза прямоугольного треугольника AOB , м.

Радиус водила r'_b (катет AB) найден из выражения (6):

$$r'_b = AB = OB \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (7)$$

Для определения радиуса конусного ролика на схеме (см. рисунок 6) рассмотрен треугольник AOC . Для этого определено значение острого угла $\beta/2$ по формуле

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{AC}{AO}, \quad (8)$$

где β – угол наклона образующих конусного ролика, град.;

AC – катет, равный величине радиуса конусного ролика, $AC = r'_k$, м;

AO – гипотенуза прямоугольного треугольника AOC и одновременно катет прямоугольного треугольника AOB , м.

```
def main():
    # Определим передаточное отношение
    print(cl.Fore.RED + "Определение передаточного отношения")
    print(cl.Fore.BLUE + "Введите значение Va, м/с")
    Va = float(input()) #Абсолютная скорость точки А, м/с
    print(cl.Fore.BLUE + "Введите значение alpha, град")
    alpha = float(input()) #Угол между центром устройства и осью конусного
    ролика, град
    print(cl.Fore.BLUE + "Введите значение beta, град")
    beta = float(input()) #Угол наклона образующих конусного ролика, град
    print(cl.Fore.BLUE + "Введите значение OB, м")
    OB = float(input()) #Гипотенуза прямоугольного треугольника AOB
```

Рисунок 7 – Фрагмент исходного кода исходных данных
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – A fragment of the source code of the source data
Source: compiled by the authors.

```
#Выводим результаты
print(cl.Fore.MAGENTA + f"Передаточное отношение устройства: {i_cr}")
print(cl.Fore.MAGENTA + f"Угловая скорость водила ω1: {omega_1}, рад/с")
print(cl.Fore.MAGENTA + f"Угловая скорость конусного ролика ω2:
{omega_2}, рад/с")

print(cl.Fore.BLACK + f"Радиус водила (AB): {rv}, м")
print(cl.Fore.BLACK + f"Гипотенуза прямоугольного треугольника AOC и
одновременно катет прямоугольного треугольника AOB: {AO}, м")
print(cl.Fore.BLACK + f"Радиус конусного ролика (катет AC): {rk}, м")
```

Рисунок 8 – Фрагмент исходного кода результатов расчета передаточного отношения
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Fragment of the source code of the gear ratio calculation results
Source: compiled by the authors.

Радиус конусного ролика r_k' (катет AC) найден из выражения (8):

$$r_k' = AC = AO \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (9)$$

Для определения катета AO на схеме (см. рисунок 6) рассмотрен треугольник AOB. Для этого определено значение косинуса угла $\beta/2$ по формуле

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{AO}{OB}. \quad (10)$$

Катет AO определен из выражения (10):

$$AO = OB \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (11)$$

Значение катета AO из (11) подставлено в (9) и получено следующее выражение:

$$r_k' = AC = OB \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (12)$$

Полученные данные из (7) и (12) подставлены в формулу (5), и после преобразования получено выражение

$$i_{кр} = \frac{r'_k}{r'_e} = \frac{AC}{AB} = \frac{OB \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{OB \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (13)$$

В результате преобразований выражения (13) получена следующая формула:

$$i_{кр} = \frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (14)$$

Выражение (14) считается окончательным преобразованием передаточного отношения (1) нового устройства для глубокого уплотнения грунтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе выполнения математического моделирования получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660077 «Расчёт параметров устройства для глубокого уплотнения грунтов». Фрагменты исходного кода программы для расчета передаточного отношения устройства на языке программирования Python представлены ниже (рисунки 7, 8).



Рисунок 9 – Экспериментальный образец нового устройства для глубокого уплотнения грунтов
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Experimental sample of the new device for deep soil compaction
Source: compiled by the authors.

Полученное выражение (14) можно использовать для нахождения крутящего момента, необходимого для вращения нового устройства для глубокого уплотнения грунтов (рисунок 9), изготовленного авторским коллективом в НИИ «Опытное машиностроение» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск.

Материал о новой разработке авторского коллектива опубликован в средствах массовой информации:

- телеканал «УРАЛ1»: https://vk.com/wall-18784359_68801
- ЮУрГУ (НИУ): <https://www.susu.ru/ru/news/2025/11/05/razrabotka-uchenyhpomozhet-dorogam-prosluzhit-25-let-bezremonta>
- Правительство Челябинской области: <https://pravmin.gov74.ru/prav/news/view.htm?id=11700080>

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны кинематические схемы для определения передаточного отношения нового устройства для глубокого уплотнения грунтов.
2. Расписаны математические модели угловых скоростей водила и конусного ролика данного устройства.
3. Определена зависимость передаточного отношения от геометрических характеристик нового устройства.
4. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660077 «Расчёт параметров устройства для глубокого уплотнения грунтов».
5. Изготовлен экспериментальный образец нового устройства для глубокого уплотнения грунтов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Riekstins A., Haritonovs V., Straupe V. et al. Comparative environmental and economic assessment of a road pavement containing multiple sustainable materials and technologies // Construction and Building Materials. 2024. V. 432, 136522. P. 1-15. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136522
2. Alamgir M., Mason J. Campbell Sloan S. et al. Economic, Socio-Political and Environmental Risks of Road Development in the Tropics // Current Biology. 2017. V. 27. P. 1130-1140. DOI: 10.1016/j.cub.2017.08.067
3. Chauhan S., Dongol R., Chauhan R. Evaluation of economic loss of urban road flooding: A case of Kathmandu Metropolitan City // Environmental Challenges. 2023. V. 13, 100773. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.envc.2023.100773

4. Wijnen W. Socio-economic costs of road crashes in middle-income countries: Applying a hybrid approach to Kazakhstan // *IATSS Research*. 2021. V. 45. P. 293–302. DOI: 10.1016/j.iatssr.2020.12.006
5. Mohsin A.K.M., Tushar H., Hossain S.F.A. et al. Green logistics and environment, economic growth in the context of the Belt and Road Initiative // *Heliyon*. 2022. V. 8, e09641. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09641
6. Baliello A., Wang D. *Advances in Road Engineering: Innovation in Road Pavements and Materials // Buildings*. 2024. V. 14, 2250. P. 1–5. DOI: 10.3390/buildings14072250
7. Кромский Е.И., Жилияев С.В. Новая техника для уплотнения земляного полотна // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2016. Т. 16, № 2. С. 14–22. DOI: 10.14529/engin160202
8. Massarsch K.R., Fellenius B.H. Deep vibratory compaction of granular soils // Chapter 19 in *Ground Improvement-Case Histories*, Elsevier publishers, 2005. P. 633–658.
9. Мартюченко И.Г., Иванов С.В. Выбор рациональных размерно-геометрических параметров мерзлоторыхлительного оборудования // *Строительные и дорожные машины*. 2015. № 7. С. 49–51.
10. Skrypchenko O., Katerina K., Tetiana K., Bieliatynskyi A. Method of increasing the roughness of the existing road // 15th International scientific conference «Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development». 2016. № 165. P. 1766–1770. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.920
11. Baidya D.K., Krishna G.M. Investigation of Resonant Frequency and Amplitude of Vibrating Footing Resting on a Layered Soil System // *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, № 4, 2001, pp. 409–417.
12. Савельев С.В., Бурый Г.Г. Анализ уплотнения грунтов перспективными вибрационными катками // *Строительные и дорожные машины*. 2013. № 1. С. 8–10.
13. Abbas R.K. A review on the wear of oil drill bits (conventional and state of the art approaches for wear reduction and quantification) // *Eng. Fail. Anal.* 90, 2018, pp. 554–584. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.026>
14. Holger P., Marco B., Alexander K. et al. Dynamic soil compaction – recent methods and research tools for innovative heavy equipment approach // *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5)*. 2015. № 125. P. 390–396. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.096
15. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. Promising Machine for Compacting Road-Building Materials // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. 2020. Vol. 1. P. 21–28. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_3
16. Asfandiarov M.A., Kromsky E.I., Tilloev K.Z. Development of methods for the computer calculation of a new composite materials compaction mechanism // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 1. P. 71–78.
17. Kromsky E.I., Tilloev K.Z., Muhiddinzoda K.J. New Mechanism for Composite Materials Compaction // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. 2021. Vol. 1. P. 173–180.
18. Koshel S., Koshel G. Structural analysis of the mechanism with a third-class structure group of the fourth order // New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing company, 2019. p. 29–33.
19. Кромский Е.И., Кондаков С.В., Асфандияров М.А. Перспективы развития техники для строительства автомобильных дорог с твердым цементобетонным покрытием // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2018. Т.18, № 3. С.30–38.
20. Тиллоев К.З., Кондаков С.В., Шарифов Д.А. Оценка эффективности гусеничного экскаватора с новым технологическим оборудованием // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2023. № 1. С. 125–132. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_1_125
21. Пономаренко Ю.Е., Баранов Н.Б. Устройство набивных свай с применением винтового рабочего органа // *Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях: Сб. трудов*. Уфа: Изд-во Башнистрой, 2006. С. 115–118.
22. Heins E., Seitz K.F., Chmelnickijetal A. Advances in numerical modelling of different ground improvement techniques // *Geotechnical Engineering*. 2017. №. 48 (3). P. 87–94.
23. 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
24. Кромский Е.И., Кондаков С.В., Тиллоев К.З., Кадырова Х.И. Новое сменное оборудование гидравлического экскаватора // *Политехнический вестник. Серия «Инженерные исследования»*. 2018. № 3 (43). С. 50–54.
25. Тиллоев К.З. Математическая модель процесса работы конусного раскатчика // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2019. Т. 19, № 3. С. 60–67. DOI: 10.14529/engin190307
26. Кондаков С.В., Асфандияров М.А., Гундарев К.А. Математическое моделирование устройства для глубокого уплотнения грунтов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2021. Вып. 21. № 2. С. 52–59.
27. Asfandiarov M.A., Kromsky E.I., Tilloev K.Z. Development of methods for the computer calculation of a new composite materials compaction mechanism // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 1. P. 71–78.
28. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Asfandiarov M.A. Mathematical Model of Mechanism for Sealing Hardly Deformable Materials // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Vol. 1. P. 11–20.

REFERENCES

1. Riekstins A., Haritonovs V., Straupe V. et al. Comparative environmental and economic assessment of a road pavement containing multiple sustainable materials and technologies. *Construction and Building Materials*. 2024; V. 432, 136522. P. 1–15. DOI: 101016/j.conbuildmat.2024.136522

2. Alamgir M., Mason J. Campbell, Sloan S. et al. Economic, Socio-Political and Environmental Risks of Road Development in the Tropics. *Current Biology*. 2017; V. 27. P. 1130-1140. DOI: 10.1016/j.cub.2017.08.067
3. Chauhan S., Dongol R., Chauhan R. Evaluation of economic loss of urban road flooding: A case of Kathmandu Metropolitan City. *Environmental Challenges*. 2023; V. 13, 100773. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.envc.2023.100773
4. Wijnen W. Socio-economic costs of road crashes in middle-income countries: Applying a hybrid approach to Kazakhstan. *IATSS Research*. 2021; V. 45. P. 293-302. DOI: 10.1016/j.iatssr.2020.12.006
5. Mohsin A.K.M., Tushar H., Hossain S.F.A. et al. Green logistics and environment, economic growth in the context of the Belt and Road Initiative. *Heliyon*. 2022; V. 8, e09641. P. 1-7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09641
6. Baliello A., Wang D. *Advances in Road Engineering: Innovation in Road Pavements and Materials*. Buildings. 2024; V. 14, 2250. P. 1-5. DOI: 10.3390/buildings14072250
7. Kromsky E.I., Zhilyaev S.V. New technique for compaction of the roadbed. *Bulletin of SUSU. The series «Mechanical Engineering»* 2016; Vol. 16, № 2. P. 14–22. DOI: 10.14529/engin160202.
8. Massarsch K.R., Fellenius B.H. *Deep vibratory compaction of granular soils*. Chapter 19 in *Ground Improvement-Case Histories*, Elsevier publishers, 2005; P. 633–658.
9. Martyuchenko I.G., Ivanov S.V. The choice of rational dimensional and geometric parameters of permafrost-leaching equipment. *Construction and road machines*. 2015; № 7. P. 49–51.
10. Skrypchenko O., Katerina K., Tetiana K., Bieliatynskiy A. Method of increasing the roughness of the existing road. 15th International scientific conference «Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development». 2016; № 165. P. 1766–1770. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.920
11. Baidya D.K., Krishna G.M. Investigation of Resonant Frequency and Amplitude of Vibrating Footing Resting on a Layered Soil System. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, № 4, 2001, pp. 409–417.
12. Savelyev S.V., Brown G.G. Analysis of soil compaction by promising vibrating rollers. *Construction and road vehicles*. M., 2013; № 1. P. 8–10.
13. Abbas R.K. A review on the wear of oil drill bits (conventional and state of the art approaches for wear reduction and quantification). *Eng. Fail. Anal.* 90, 2018; pp. 554–584. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.026>
14. Holger P., Marco B., Alexander K. et al. Dynamic soil compaction – recent methods and research tools for innovative heavy equipment approach. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). 2015; № 125. P. 390–396. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.096
15. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. Promising Machine for Compacting Road-Building Materials. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. 2020; Vol. 1. P. 21–28. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_3
16. Asfandiarov M.A., Kromsky E.I., Tilloev K.Z. Development of methods for the computer calculation of a new composite materials compaction mechanism. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 1. P. 71–78.
17. Kromsky E.I., Tilloev K.Z., Muhiddinzoda K.J. New Mechanism for Composite Materials Compaction. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) 2021*. Vol. 1. P. 173–180.
18. Koshel S., Koshel G. Structural analysis of the mechanism with a third-class structure group of the fourth order. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing company, 2019; p. 29-33.
19. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Asfandiyarov M.A. Prospects for the development of technology for the construction of highways with a solid cement-concrete coating. *Bulletin of SUSU. The series «Mechanical Engineering»*. 2018; Vol.18, №3. P. 30-38.
20. Tilloev K.Z., Kondakov S.V., Sharifov D.A. Report on the effectiveness of a crawler excavator with a new technology skim equipment. *Tru NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2023; No.: 1, pp. 125–132. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_1_125
21. Ponomarenko Y.E., Baranov N.B. The device of packed piles using a screw working body. *Problems of soil mechanics and foundation construction in difficult ground conditions: Collection of works*. Ufa: Publishing House of the Tower, 2006. P. 115–118.
22. Heins E., Seitz K.F., Chmelnizkijetal A. Advances in numerical modelling of different ground improvement techniques. *Geotechnical Engineering*. 2017; №. 48 (3). P. 87–94.
23. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z., Kadyrova H.I. New replaceable equipment of a hydraulic excavator. *Polytechnic Bulletin. The series «Engineering Research»*. 2018; № 3 (43). P. 50-54.
24. Tilloev K.Z. Mathematical model of the cone rolling machine operation process. *Bulletin of SUSU. The series «Mechanical Engineering»*. 2019; Vol. 19, № 3: P. 60–67. DOI:10.14529/engin190307
25. Kondakov S.V., Asfandiyarov M.A., Gundarev K.A. Mathematical modeling of a device for deep soil compaction. *Bulletin of SUSU. The series «Mechanical Engineering»*. 2021; Vol. 21. № 2. P. 52–59.
26. Tilloev K.Z., Kondakov S.V., Asfandiyarov M.A. Theoretical and experimental study of the process of deep soil compaction by a cone roller. *Izvestiya vuzov. Mining magazine*. 2021; № 3. P. 60–70. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-60-70
27. Asfandiarov M.A., Kromsky E.I., Tilloev K.Z. Development of methods for the computer calculation of a new composite materials compaction mechanism. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 1. P. 71–78.
28. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Asfandiyarov M.A. Mathematical Model of Mechanism for Sealing Hardly Deformable Materials. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Vol. 1. P. 11-20.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Гундарев К.А. Обзор и анализ используемой литературы, вывод математических моделей, оформление текста, математических моделей и схем научной статьи, написание выводов, изготовление и сборка экспериментального образца нового устройства для глубокого уплотнения арунтов, 31%.

Кондаков С.В. Руководство написанием научной статьи, проверка текста и схем, 15%.

Подзерко А.В. Проверка математических моделей научной статьи на достоверность рабочего процесса, 9%.

Асфандияров М.А. Разработка кинематических схем, вывод математических моделей по схемам, 30%.

Левшин И.Е. Обзор и анализ используемой литературы, введение, вывод математических моделей, оформление текста, математических моделей и схем научной статьи, написание выводов, 15%.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Gundarev K.A. Literature review and analysis, building mathematical models, preparing schemes, drawing conclusions, manufacture and assembly of the experimental sample of the new device for deep soil compaction, writing the manuscript.

Kondakov S.V. General guidance on the research design and writing the manuscript, approving the text and schemes.

Podzerko A.I.V. Verification of mathematical models, confirming the reliability of the workflow.

Asfandiyarov M.A. Development of kinematic schemes, derivation of mathematical models from the schemes.

Levshin I.E. Literature review and analysis, building mathematical models, writing the manuscript, drawing conclusions.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гундарев Кирилл Александрович – инженер кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8358-1329>,

SPIN-код: 1238-1158,

e-mail: gundarevka@susu.ru

Кондаков Сергей Владимирович – д-р техн. наук, проф., проф. Передовой инженерной школы двигателестроения и специальной техники «Сердце Урала» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6818-1694>,

SPIN-код: 3410-2300,

Author ID: 509941,

Scopus ID: 56556574700,

e-mail: kondakovsv@susu.ru

Подзерко Александр Викторович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>,

SPIN-код: 1796-0253,

Author ID: 410625,

Scopus ID: 57197827508,

Researcher ID: AAL-5472-2021,

e-mail: podzerkoav@susu.ru

Асфандияров Марат Андреевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1868-0232>,

SPIN-код: 3101-7174,

e-mail: asfandiyarovma@susu.ru

Левшин Игорь Евгеньевич – аспирант кафедры «Автомобили и автомобильный сервис», инженер кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0532-1751>,

e-mail: igor_levshin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gundarev Kirill A. – engineer at the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8358-1329>,

SPIN-code: 1238-1158,

e-mail: gundarevka@susu.ru

Kondakov Sergey V. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Advanced Engineering School of Engine Building and Heart of the Urals Equipment, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6818-1694>,

SPIN-code: 3410-2300,

Author ID: 509941,

Scopus ID: 56556574700,

e-mail: kondakovsv@susu.ru

Podzerko Alexander V. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>,

SPIN-code: 1796-0253,

Author ID: 410625,

Scopus ID: 57197827508,

Researcher ID: AAL-5472-2021,

e-mail: podzerkoav@susu.ru

Asfandiyarov Marat A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1868-0232>,

SPIN-code: 3101-7174,

e-mail: asfandiyarovma@susu.ru

Levshin Igor E. – postgraduate student of the Department of Automobile Engineering and Car Service, engineer at the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University (76, Prospect Lenina, Chelyabinsk, 454080).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0532-1751>,

e-mail: igor_levshin@mail.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT