

ОБЗОР И АНАЛИЗ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИЗАЦИИ ГЛУБОКОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

С.В. Кондаков, kondakovsv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6818-1694>
А.В. Подзерко, podzerkoav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>
М.А. Асфандияров, asfandiiarovma@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-1868-0232>
К.А. Гундарев, pioneer03.95@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8358-1329>
И.Е. Левшин, igor_levshin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0532-1751>
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена существующая ситуация в области уплотнения грунтов. Выделены два вида уплотнения: поверхностное и глубокое. Рассмотрены дорожно-строительные машины и оборудование для каждого вида уплотнения грунтов. К первому виду отнесены дорожные катки, грунтовые катки и устройство для уплотнения грунта, у которых выявлены основные преимущества и относительные недостатки. Относительными недостатками приведенных конструкций выступают малая глубина уплотнения, компрессионное сжатие воздуха в массиве грунта и большие энергозатраты базовых машин. Во второй вид уплотнения выделены рабочий орган землеройных машин, агрегат для глубокого трамбования грунта, спиралевидные снаряды, шнековая головка перемещения грунта для установки свай, устройство для бурения и уплотнения грунта, устройство для вращающегося проникновения и конусный раскатчик. Каждое оборудование для глубокого уплотнения грунта подробно рассмотрено и проанализировано. Выявлены положительные стороны технических решений и относительные недостатки, к которым отнесены в основном большая площадь контакта рабочих органов с уплотняемым грунтом, большое осевое усилие базовой машины при внедрении рабочих органов в грунт, раскачиваемость, компрессионное сжатие воздуха в массиве грунта, преобладание силы трения скольжения над силой трения качения, большие энергозатраты при внедрении рабочих органов в грунт. За аналог взяты устройства с преобладанием силы трения качения, так как в таком случае энергозатраты базовых машин минимальны за счет обкатывания рабочих органов по поверхности грунта. Уменьшение осевого усилия у некоторых аналогов решено за счет применения винтовых наконечников на рабочих органах. Выявленные недостатки будут учтены при проектировании нового устройства для глубокого уплотнения грунтов.

Ключевые слова: дорожно-строительные машины, дорожные катки, раскатка котлованов, динамически-уравновешенная система, конусный раскатчик, поверхностное уплотнение грунтов, глубокое уплотнение грунтов, трамбование грунта, рабочий орган, бурение

Для цитирования: Обзор и анализ научной проблемы механизации глубокого уплотнения грунтов / С.В. Кондаков, А.В. Подзерко, М.А. Асфандияров и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2026. Т. 26, № 1. С. 16–26. DOI: 10.14529/engin260102

Original article

DOI: 10.14529/engin260102

REVIEW AND ANALYSIS OF THE SCIENTIFIC PROBLEM OF DEEP SOIL COMPACTION MECHANIZATION

S.V. Kondakov, kondakovsv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6818-1694>

A.V. Podzerko, podzerkoav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>

M.A. Asfandiyarov, asfandiyarovma@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-1868-0232>

K.A. Gundarev, pioneer03.95@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8358-1329>

I.E. Levshin, igor_levshin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0532-1751>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The scientific article examines the current situation in the field of soil compaction. Two types of compaction are distinguished: surface and deep. Road construction machinery and equipment for each type of soil compaction are considered. The first type includes road rollers, dirt rollers and a soil compaction device, which have the main advantages and relative disadvantages. The relative disadvantages of these structures are the low compaction depth, compression compression of air in the soil mass and high energy consumption of basic machines. The second type of compaction includes the working body of earth-moving machines, an assembly for deep tamping of soil, spiral projectiles, a screw head for moving soil for installing piles, a device for drilling and compacting soil, a device for rotating penetration and a cone roller. Each equipment for deep soil compaction has been reviewed and analyzed in detail. The positive aspects of technical solutions and relative disadvantages have been identified, which include, mainly, the large contact area of the working bodies with the compacted soil, the large axial force of the base machine when the working bodies are embedded in the soil, swinging, compressive compression of air in the soil mass, the predominance of sliding friction over rolling friction, high energy consumption when the workers are embedded organs in the ground. Devices with a predominance of rolling friction are taken as an analogue, since in this case the energy consumption of the basic machines is minimal due to the rolling of the working bodies on the ground surface. The reduction of axial force in some analogues is solved by using screw tips on the working bodies. The identified shortcomings will be taken into account when designing a new device for deep soil compaction.

Keywords: road construction machinery, road rollers, excavation, dynamically balanced system, cone roller, surface compaction of soils, deep compaction of soils, tamping of soil, working body, drilling

For citation: Kondakov S.V., Podzerko A.V., Asfandiyarov M.A., Gundarev K.A., Levshin I.E. Review and analysis of the scientific problem of deep soil compaction mechanization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2026:26(1):16–26. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin260102

Введение

Система транспортных связей является стратегически важным условием экономического развития России [1, 2] и других стран [3–15]. Автомобильный транспорт считается самым распространенным видом мобильных средств передвижения, поэтому занимает одно из ведущих мест в этой системе. Автомобили способствуют массовому перемещению пассажиров до мест приложения труда, отдыха, своевременной доставки грузов в пункты назначения, путешествий и т. п.

Надежность и безотказность автомобильного транспорта зависит от многих факторов, одним из которых выступает качество дорожного полотна. В настоящее время дорожное полотно не в полной мере отвечает требуемым показателям: увеличению грузоподъемности транспортных средств, увеличению максимальной скорости, участвовавшим случаям размыва оснований дорог и гидротехнических сооружений (плотин, дамб и т. п.).

Одной из главных причин низкого качества автомобильных дорог и гидротехнических сооружений выявлена следующая – недостаточное уплотнение насыпных и просадочных грунтов. Возникает необходимость в обеспечении таких грунтов повышенной плотностью и оптимальной

устойчивостью от размыва грунтовыми водами путем лучшего уплотнения существующими и новыми дорожно-строительными машинами и оборудованием.

В настоящее время дорожно-строительные машины для уплотнения насыпных и просадочных грунтовых оснований автомобильных дорог и гидротехнических сооружений механическим способом подразделяются на два вида – машины и оборудование для поверхностного и глубокого уплотнения.

Обзор и анализ конструкций

К машинам для поверхностного уплотнения относятся дорожные и грунтовые катки, отличающиеся массой и формой вальцов. Уплотнение грунта производится с постепенным увеличением массы катка и находится в пределах от 0,3 до 0,9 м [16].

Научная школа МАДИ (кафедра «Строительные и дорожные машины») оказала огромное влияние на изучение вопросов взаимодействия рабочих органов строительных машин с обрабатываемой средой [17].

В процессе уплотнения грунтовыми катками часть воды и воздуха вдавливаются в массив обрабатываемого грунта, образуя неустойчивую механическую структуру. Увеличение силы сжатия (увеличение массы и мощности машины и навесного оборудования) только увеличивает компрессионное сжатие воздуха и возникновение трещин, ухудшая физико-механические свойства уплотненного грунта [18].

Основным преимуществом грунтовых катков поверхностного уплотнения является простота конструкции вальцов. К недостаткам относятся неравномерная передача напряжений на грунт, низкая производительность уплотнения в пределах толщины слоя, а также недопустимое превышение предельной толщины слоя уплотняемого грунта.

Другой способ уплотнения грунтов, основанный на работе конических элементов (рис. 1), предложен учеными кафедры «Строительные и дорожные машины» МАДИ и защищен авторским свидетельством [19].

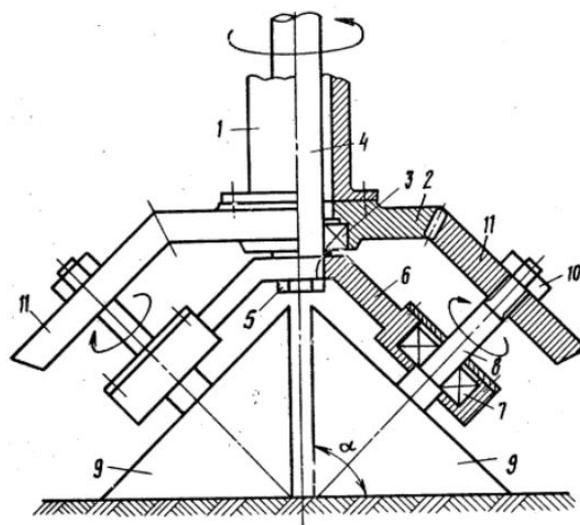


Рис. 1. Устройство для уплотнения грунта: 1 – неподвижный корпус; 2 – зубчатый венец; 3, 7 – подшипник; 4 – приводной вал; 5 – болт; 6 – траверса; 8 – ось; 9 – конический элемент; 10 – гайка; 11 – коническая шестерня

Fig. 1. Device for soil compaction: 1 – fixed body; 2 – gear ring; 3, 7 – bearing; 4 – drive shaft; 5 – bolt; 6 – traverse; 8 – axis; 9 – conical element; 10 – nut; 11 – bevel gear

Целью данного устройства является повышение эффективности и качества уплотнения за счет предотвращения сдвига грунта перед коническими элементами. Устройство снабжено синхронизатором вращения конических элементов в виде зубчатого венца и конических шестерен.

Относительными недостатками рассмотренной конструкции являются небольшая глубина уплотнения, возможен выход из строя конических шестерен из-за попадания в зацепление твердых частиц грунта.

Для уменьшения компрессионного сжатия воздуха в массиве грунта может применяться рабочий орган землеройных машин (рис. 2) [20].

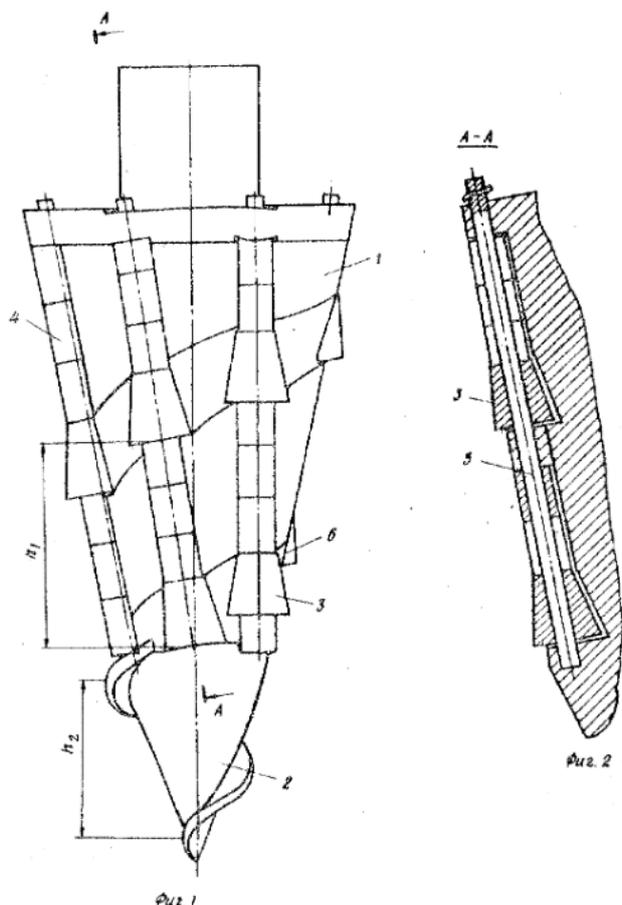


Рис. 2. Рабочий орган землеройных машин:
n1 – шаг винтовой линии конуса штанги; n2 – шаг
винта наконечника; 1 – приводная конусная штанга;
2 – винтовой наконечник; 3 – конусные катки;
4 – цилиндрические катки; 5 – оси; 6 – выступы

Fig. 2. Working body of earthmoving machines:
n1 – pitch of the screw line of the rod cone; n2 – pitch
of the tip screw; 1 – drive cone rod; 2 – screw tip;
3 – cone rollers; 4 – cylindrical rollers; 5 – axes;
6 – projections

Целью изобретения является снижение энергоемкости разработки грунта за счет использования катков для создания тягового усилия в рабочем режиме. Может использоваться для расширения скважин или при разработке мерзлого грунта методом крупного скола. Использование предлагаемого изобретения позволяет снизить энергоемкость разработки грунта за счет того, что взаимодействие катков и грунта сводится к перекатыванию катков по винтовой уплотненной поверхности грунта с преодолением сил трения качения.

Недостатками описанной конструкции считаются:

– катки установлены большим основанием книзу, а меньшим основанием – кверху, и образующиеся выступы будут создавать дополнительное сопротивление при внедрении рабочего органа землеройных машин в обрабатываемый грунт, чем только увеличивают осевое усилие;

– зазоры между приводной конусной штангой и катками являются конструктивно минимальными и могут способствовать заклиниванию катков от налипающего грунта на поверхности катков, что способствует переходу от трения качения в трение скольжения и увеличивает сопротивление качению рабочего органа.

Учеными Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (НГАСУ) была предложена новая техника и технология строительства

зданий и сооружений на трамбованном грунте, доведенная до промышленного использования [21].

Ученые НГАСУ, сравнивая различные типы катков и принимая во внимание их существенные недостатки при эксплуатации, разработали новую технику, которая представляет собой агрегат для глубинного трамбования грунта (рис. 3). Устройство используется для предупредительного уплотнения насыпного грунта, а также для образования котлованов заданной формы для размещения прогрессивных столбчатых полосовых фундаментов. По сравнению с существующими методами уплотнения грунта производительность агрегата увеличивается в 5–8 раз, энергопотребление (расход топлива) снижается в 3 раза. Передача ударных импульсов через грунт при работе агрегата на близко расположенных зданиях и сооружениях в 2–3 раза меньше, чем при уплотнении грунтов падающими трамбовками.

Относительными недостатками агрегата являются низкая производительность, увеличенная себестоимость производства работ, существенно большие динамические нагрузки на рабочий орган и поэтому относительно малая надёжность оборудования, большая площадь контакта рабочего органа с поверхностью грунта котлована, достигающая примерно 3,5 м², дополнительные

усилия на преодоление сопротивления силы трения двух поверхностей, компрессионное сжатие воздуха в массиве грунта.



Рис. 3. Рабочий орган агрегата для глубинного трамбования грунта
Fig. 3. The working body of the unit for deep tamping of soil

С целью уменьшения силы трения в процессе глубокого уплотнения грунтов применяют способы раскатки скважин различными устройствами в виде спиралевидных снарядов (рис. 4) для образования свай без выемки грунта [22–27] путем вытеснения его в радиальном и вертикальном направлениях неуплотненного массива грунта.

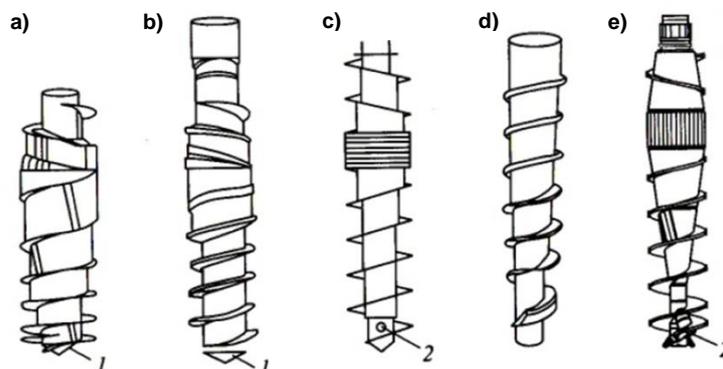


Рис. 4. Спиралевидные снаряды: а – Омега (Бельгия, фирма «Френки фондейшон»);
b – Де Вааль (США); с – Беркель; d – Скрюсол; e – Бауэр (Германия, фирма
«РГТ Раммтехник»); 1 – теряемый башмак; 2 – отверстие для подачи бетона

Fig. 4. Spiral projectiles: a – Omega (Belgium, Frankie Foundation company); b – De Waal (USA);
c – Berkel; d – Skrusol; e – Bauer (Germany, RGT Rammtechnik company); 1 – lost shoe;
2 – hole for concrete supply

Шнековая головка перемещения грунта для установки свай (рис. 5) позволяет уплотнять более стойкие, а также песчаные грунты [28] за счет увеличения шага винтового шнека от начала к середине головки. Такое конструктивное решение позволяет уменьшить крутящий момент при внедрении шнековой головки в грунт. Постепенно увеличивающийся диаметр сердечника шнековой головки снизу-вверх позволяет эффективнее уплотнять грунт.

Относительными недостатками являются преобладающая сила трения скольжения большой площадью контакта, достигающей примерно 4 м^2 , что требует большой мощности базовой машины (более 100 кВт) с ее большой массой (более 70 т), и ограничение диаметра скважины до 610 мм.

Устройство для бурения и уплотнения грунта (рис. 6) применяется при изготовлении опор фундаментов [29]. Устройство 1 для бурения и уплотнения грунтов состоит из трамбовочного наконечника 1А, жестко соединенного с валом 3, который соединён с концевой частью батареи

стержней, перемещаемых бурильной машиной. Батарея стержней вставлена в покрывающую трубу 14. Между трамбовочным наконечником 1А и трубой 14 установлен цилиндрический трамбовочный элемент, приспособленный для формирования диаметра уплотнения грунта.

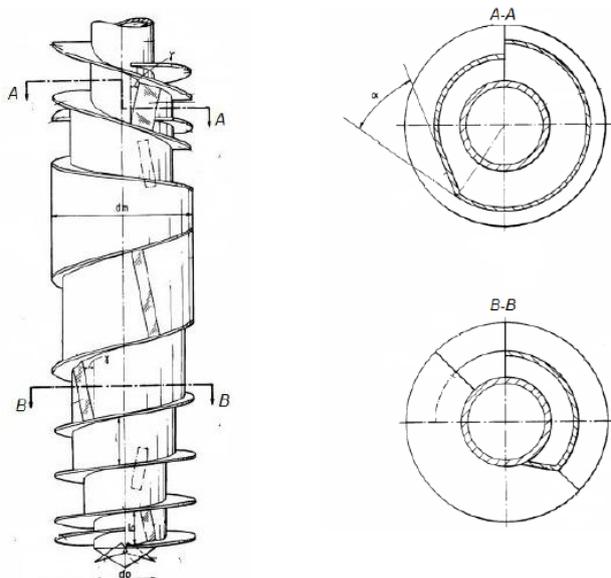


Рис. 5. Шнековая головка перемещения грунта для установки свай

Fig. 5. Screw head for moving soil for installing piles

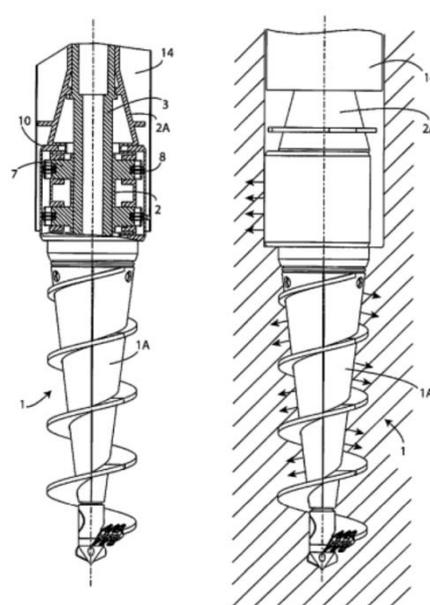


Рис. 6. Устройство для бурения и уплотнения грунта

Fig. 6. Device for drilling and compaction of soil

Относительными недостатками являются малый угол конуса трамбовочного наконечника без плавного перехода конусной части в цилиндрическую часть трубы, преобладание трения скольжения, что создает дополнительное осевое усилие со стороны дорожно-строительной машины при работе данного устройства.

Известно устройство вращающегося проникновения (рис. 7). Данное изобретение относится к способу роторной проходки, позволяющему строить скважину в массиве без выхода грунта путем сжатия и создания высокого давления на грунт, и к устройству для роторной проходки [30].

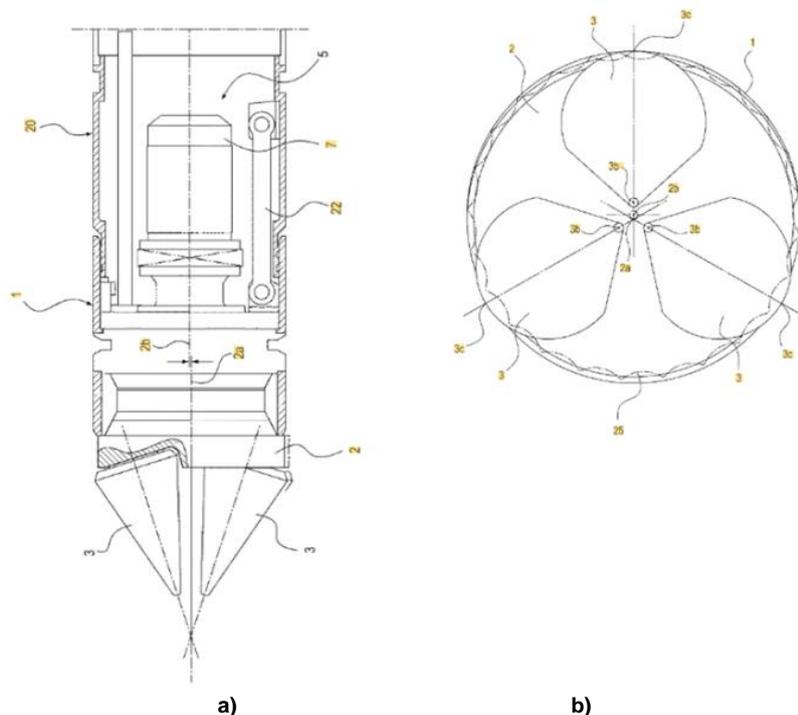


Рис. 7. Устройство для вращающегося проникновения: а – вид спереди; б – вид сверху; 1 – защитный корпус; 2 – поворотная головка; 2а – ось вращения; 2б – орбитальная ось; 3 – конусообразный ротор; 3б – верхняя часть; 3с – основание; 5 – приводное устройство; 7 – приводной механизм; 20 – защитный кожух; 22 – планки; 25 – направляющая линия

Fig. 7. Device for rotating penetration: a – front view; b – top view; 1 – protective housing; 2 – rotary head; 2a – axis of rotation; 2b – orbital axis; 3 – cone-shaped rotor; 3b – upper part; 3c – base; 5 – drive device; 7 – drive mechanism; 20 – protective casing; 22 – slats; 25 – guide line

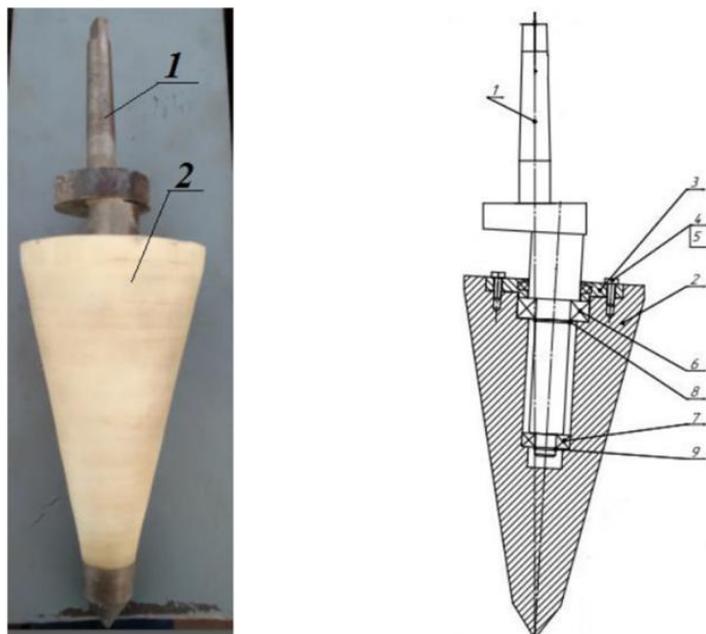


Рис. 8. Экспериментальный образец конусного раскатчика:
1 – эксцентриковый вал; 2 – конус; 3 – крышка подшипника;
4, 5 – болтовое крепление; 6, 7 – подшипниковые опоры;
8, 9 – стопорные кольца

Fig. 8. Experimental sample of a cone roller: 1 – eccentric shaft;
2 – cone; 3 – bearing cover; 4, 5 – bolt fastening; 6, 7 – bearing supports; 8, 9 – locking rings

(приводного вала экспериментального стенда) во время технологического процесса и большое осевое усилие на приводной вал.

Выводы

1. Проведен обзор существующих конструкций машин и механизмов для поверхностного и глубокого уплотнения грунта.
2. Проведен анализ данных конструкций на предмет возможного применения технических решений при проектировании нового устройства для глубокого уплотнения грунтов при строительстве гидротехнических сооружений и дорог.
3. Выявлены относительные недостатки данных конструкций.

Список литературы

1. Морозов М.Г., Комин А.В., Шакирова Н.Б. Итоги реализации водной стратегии Российской Федерации применительно к обеспечению безопасности гидротехнических сооружений // Водное хозяйство России, 2018. № 2. С. 46–56. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-2-4>
2. Чудинов С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса: монография. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 164 с.
3. Baliello A., Wang D. Advances in Road Engineering: Innovation in Road Pavements and Materials // Buildings. 2024. Vol. 14(2250). P. 1–5. <https://doi.org/10.3390/buildings14072250>
4. Comparative environmental and economic assessment of a road pavement containing multiple sustainable materials and technologies / A. Riekstins, V. Haritonovs, V. Straupe, R. Izaks, R. Merijs-Meri, J. Zicans // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 432(136522), pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136522>
5. Dehghan Shabari Z., Safaie S. Do transport infrastructure spillovers for economic growth? Evidence on road and railway transport infrastructure in Iranian provinces // Regional Science Policy Practice. 2018. Vol. 10. P. 49–63. <https://doi.org/10.1111/rsp3.12114>
6. Thibenda M., Wedagama D.M.P., Dissanayake D. Drivers' attitudes to road safety in the South East Asian cities of Jakarta and Hanoi: Socio-economic and demographic characterisation by Multiple

Относительными недостатками может быть скручивание (смещение от оси вращения) роторов при уплотнении грунта, сложность конструкции, отсутствие винтового наконечника для уменьшения осевого усилия.

Е.И. Кромским и др. предложен конусный раскатчик (рис. 8) для глубокого уплотнения грунта [31], который обкатывает уплотняемый грунт малой площадью контакта, обеспечивая энергоэффективность технологического процесса. Конструктивной особенностью конусного раскатчика является пересечение оси участков эксцентрикового вала в точке, совпадающей с вершиной конусной оболочки. В этом случае предотвращается рыскание вершины конуса в процессе работы и обеспечивается перемещение вершины конуса в пространстве строго по вертикали.

Сравнительными недостатками конусного раскатчика являются динамическая неуравновешенность (раскачиваемость) стрелы базовой машины

Correspondence Analysis // Safety Science. 2022. Vol. 155(105869). P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105869>

7. Economic, Socio-Political and Environmental Risks of Road Development in the Tropics / M. Alamgir, Campbell J. Mason, S. Sloan, et al. // Current Biology. 2017. Vol. 27. P. 1130–1140. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.08.067>

8. A global strategy for road building/ W.L. Laurance, G.R. Clements, S. Sloan, et al. // Nature. 2014. Vol. 513. P. 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature13876>

9. Qiao Ya., Wang Z., Meng F., et al. Evaluating the economic and environmental impacts of road pavement using an integrated local sensitivity model // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 371(133615). P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133615>

10. Chauhan S., Dongol R., Chauhan R. Evaluation of economic loss of urban road flooding: A case of Kathmandu Metropolitan City // Environmental Challenges. 2023. Vol. 13(100773). P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100773>

11. Lee D., White E. Advanced materials for enhancing energy efficiency in mechanical systems // Applied Energy. 2019. Vol. 247. P. 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113627>

12. Majdoubi R., Masmoudi L., Elharif A. Analysis of soil compaction under different wheel applications using a dynamical cone penetrometer // Journal of Terramechanics. 2024. Vol. 111. P. 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.09.001>

13. Baidya D.K., Krishna G.M. Investigation of Resonant Frequency and Amplitude of Vibrating Footing Resting on a Layered Soil System // Geotechnical Testing Journal. 2001. Vol. 24(4). P. 409–417. <https://doi.org/10.1520/GTJ11138J>

14. Li Ch., Gao G. Machine learning based inversion for earth rock dam compaction density // Developments in the Built Environment. 2023. Vol. 15(100213). P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100213>

15. Dynamic soil compaction-recent methods and research tools for innovative heavy equipment approaches / H. Pankrath, M. Barthel, A. Knut, et al. // Procedia Engineering: The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). 2015. Vol. 125. P. 390–396. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.096>

16. Баловнев В.И., Глаголев С.Н., Данилов Р.Г. и др. Машины для земляных работ. Конструкция. Расчет. Потребительские свойства: в 2 кн. Кн. 2. Погрузочно-разгрузочные и уплотняющие машины: учебное пособие для вузов / под общ. ред. В.И. Баловнева. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 464 с.

17. А.с. 872619 А1 СССР Устройство для уплотнения грунта / В.И. Баловнев, А.Б. Ермилов, Ю.П. Бакагин, и др. № 2795656; заявл. 11.07.1979 // Открытия. Изобретения, 1981. № 38. 5 с.

18. Луцкий С.Я., Сакун А.Б. Интенсивная технология упрочнения слабых оснований земляного полотна // Транспортное строительство. 2015. № 8. С. 18–22. URL: <https://rucont.ru/efd/487665>

19. А.с. 907135 А1 СССР Устройство для уплотнения грунта / А.Б. Ермилов. № 2944857; заявл. 16.04.1980 // Открытия. Изобретения, 1980. № 7. 3 с.

20. А.с. 616366А1 СССР, МПК E02F 5/30 (2006.01). Рабочий орган землеройных машин / А.А. Гольдберг, Т.Г. Далалаян, С.М. Чумаков. № 2442002; заявл. 10.01.1977; опубл. 25.07.1978, Бюл. № 27. 3 с.

21. Тилоев К.З., Кондаков С.В., Шарифов Д.А. Оценка эффективности гусеничного экскаватора с новым технологическим оборудованием // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 1. С. 125–132. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_1_125

22. Patent US 6033152, Int. Cl. E02D 11/00. Pile forming apparatus / K.J. Blum (BE). Appl. No.: 09/045403; Filed: Mar. 20, 1998; Date of Patent: Mar. 7. 2000.

23. Бордуковский А.И., Гойхман Я.А. Раскатывающие и спиралевидные снаряды // Строительные и дорожные машины, 1990. № 8. С. 5–8.

24. Patent US 4458765, Int. Cl. E21B 7/26. Tool for forming of hole in macroporous compressible soil / V.I. Feklin, A.N. Mironenko, S.V. Shatov, N.S. Shvets, J.A. Kirichek (SU). Appl. No.: 377684; Filed: May 12, 1982; Date of Patent: Jul. 10, 1984. 22 p.

25. Patent US 4484640, Int. Cl. E21B 7/26. Tool for forming of holes in macroporous compressible soil / V.I. Feklin, V.B. Shvets, B.M. Mazo (SU). Appl. No.: 397438; Filed: Jul. 12.1982; Date of Patent: Nov. 27, 1984.

26. Patent US 4496011, Int. Cl. E21B 7/26. Tool for forming earth holes having fixed walls and method therefor / B.M. Mazo, V.I. Feklin (SU). Appl. No.: 402073; Filed: Jul. 26, 1982; Date of Patent: Jan. 29, 1985.

27. Patent US 4504173, Int. Cl. E02D 5/56. Apparatus for constructing cast in place tubular piles and method of constructing such piles by same apparatus / V.I. Feklin (SU). Appl. No.: 421090; Filed: Sep. 22, 1982; Date of Patent: Mar. 12, 1985. 8 p.

28. Patent US 5722498, Int. F21B 7/26. Soil displacement auger head for installing piles in the soil / W.F. Van Impe, G.A.A. Cortvrintd (BE). Appl. No.: 637747; Filed: Oct. 28, 1994; Date of Patent: Mar. 3, 1998.

29. Patent US 20110305527, Int. Cl. E02D5/36. Device and method for drilling and compacting ground / J. Curic, P. Cavalcoli, E. Biserna (BE). Appl. No.: US13/160,224; Filed: Jun 14, 2010; Date of Patent: Aug. 20, 2013. 10 p.

30. Patent J 2012-246649 A, Int. Cl. E21D9/06 (2006.01). Rotary penetration construction method and rotary penetration device / Toshio Akesaka (J). Appl. 26.05.2011; Publ.: 13.12.2012. 13 p.

31. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_21.

References

1. Morozov M.G., Komin A.V., Shakirova N.B. The results of the implementation of the water strategy of the Russian Federation in relation to ensuring the safety of hydraulic structures. *Water management of Russia*, 2018, no. 2, pp. 46–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-2-4>

2. Chudinov S.A. *Sovershenstvovaniye tekhnologii ukrepleniya gruntov v stroitel'stve avtomobil'nykh dorog lesnogo kompleksa: monografiya* [Improving soil reinforcement technology in the construction of highways in the forest complex: a monograph]. Yekaterinburg, 2022. 164 p.

3. Baliello A., Wang D. Advances in Road Engineering: Innovation in Road Pavements and Materials. *Buildings*, 2024, vol. 14(2250), pp. 1–5. <https://doi.org/10.3390/buildings14072250>

4. 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, vol. 432(136522), pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136522>

5. Dehghan Shabari Z., Safaie S. Do transport infrastructure spillovers for economic growth? Evidence on road and railway transport infrastructure in Iranian provinces. *Regional Science Policy Practice*, 2018, vol. 10, pp. 49–63. <https://doi.org/10.1111/rsp3.12114>

6. Thibenda M., Wedagama D. M. P., Dissanayake D. Drivers' attitudes to road safety in the South East Asian cities of Jakarta and Hanoi: Socio-economic and demographic characterisation by Multiple Correspondence Analysis. *Safety Science*, 2022, vol. 155(105869), pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105869>

7. Alamgir M., Campbell M.J., Sloan S., et al. Economic, Socio-Political and Environmental Risks of Road Development in the Tropics. *Current Biology*, 2017, vol. 27, pp. 1130–1140. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.08.067>

8. Laurance W.L., Clements G.R., Sloan S., et al. A global strategy for road building. *Nature*, 2014, vol. 513, pp. 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature13876>

9. Qiao Ya., Wang Z., Meng F., et al. Evaluating the economic and environmental impacts of road pavement using an integrated local sensitivity model. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 371(133615), pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133615>

10. Chauhan S., Dongol R., Chauhan R. Evaluation of economic loss of urban road flooding: A case of Kathmandu Metropolitan City. *Environmental Challenges*, 2023, vol. 13(100773), pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100773>

11. Lee D., White E. Advanced materials for enhancing energy efficiency in mechanical systems. *Applied Energy*, 2019, vol. 247, pp. 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113627>

12. Majdoubi R., Masmoudi L., Elharif A. Analysis of soil compaction under different wheel applications using a dynamical cone penetrometer. *Journal of Terramechanics*, 2024, vol. 111, pp. 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.09.001>
13. Baidya D.K., Krishna G.M. Investigation of Resonant Frequency and Amplitude of Vibrating Footing Resting on a Layered Soil System. *Geotechnical Testing Journal*, 2001, vol. 24(4), pp. 409–417. <https://doi.org/10.1520/GTJ11138J>
14. Li Ch., Gao G. Machine learning based inversion for earth rock dam compaction density. *Developments in the Built Environment*, 2023, vol. 15(100213), pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100213>
15. Pankrath H., Barthel M., Knut A., et al. Dynamic soil compaction-recent methods and research tools for innovative heavy equipment approaches. *Procedia Engineering: The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5)*, 2015, vol. 125, pp. 390–396. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.096>
16. Balovnev V.I., Glagolev S.N., Danilov R.G. et al. *Mashiny dlya zemlyanykh rabot. Konstruktsiya. Raschet. Potrebitel'skie svoystva: v 2 kn. Kn. 2. Pogruzochno-razgruzochnye i uplotnyayushchie mashiny* [Machines for Earthworks. Design. Calculation. Consumer Properties: in 2 vols. Vol. 2. Loading-Unloading and Compaction Machines: a textbook for universities]. Belgorod, 2011. 464 p.
17. Balovnev V.I., Ermilov A.B., Bakatin Yu.P. et al. *Ustroystvo dlya uplotneniya grunta* [Device for Soil Compaction]. Author's Certificate 872619 A1 USSR. No. 2795656; filed 11.07.1979. Discoveries. Inventions, 1981, no. 38. 5 p. (In Russ.)
18. Lutsky S.Ya., Sakun A.B. Intensive technology for strengthening weak subgrade bases. *Transport Construction*, 2015, no. 8, pp. 18–22. (In Russ.)
19. Ermilov A.B. *Ustroystvo dlya uplotneniya grunta* [Device for Soil Compaction]. Author's Certificate 907135 A1 USSR. No. 2944857; filed 16.04.1980. Discoveries. Inventions, 1980, no. 7. 3 p. (In Russ.)
20. Goldberg A.A., Dalalyan T.G., Chumakov S.M. *Rabochiy organ zemleroynykh mashin* [Working Element of Earthmoving Machines] / Author's Certificate 616366 A1 USSR, IPC E02F 5/30 (2006.01). No. 2442002; filed 10.01.1977; published 25.07.1978, Bull. no. 27. 3 p. (In Russ.)
21. Tilloev K.Z., Kondakov S.V., Sharifov D.A. Evaluation of the efficiency of a crawler excavator with new technological equipment. *Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev*, 2023, no. 1, pp. 125–132. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_1_125 (In Russ.)
22. Blum K.J. Pile forming apparatus. Patent US 6033152, Int. Cl. E02D 11/00. Appl. No.: 09/045403; filed Mar. 20, 1998; date of patent Mar. 7, 2000.
23. Bordukovsky A.I., Goikhman Ya.A. [Expanding and spiral tools] *Construction and Road Machines*, 1990, no. 8, pp. 5–8. (In Russ.)
24. Feklin V.I., Mironenko A.N., Shatov S.V., Shvets N.S., Kirichek J.A. Tool for forming of hole in macroporous compressible soil. Patent US 4458765, Int. Cl. E21B 7/26. Appl. No.: 377684; filed May 12, 1982; date of patent Jul. 10, 1984. 22 p.
25. Feklin V.I., Shvets V.B., Mazo B.M. Tool for forming of holes in macroporous compressible soil. Patent US 4484640, Int. Cl. E21B 7/26. Appl. No.: 397438; filed Jul. 12, 1982; date of patent Nov. 27, 1984.
26. Mazo B.M., Feklin V.I. Tool for forming earth holes having fixed walls and method therefor. Patent US 4496011, Int. Cl. E21B 7/26. Appl. No.: 402073; filed Jul. 26, 1982; date of patent Jan. 29, 1985.
27. Feklin V.I. Apparatus for constructing cast in place tubular piles and method of constructing such piles by same apparatus. Patent US 4504173, Int. Cl. E02D 5/56. Appl. No.: 421090; filed Sep. 22, 1982; date of patent Mar. 12, 1985. 8 p.
28. Van Impe W.F., Cortvrindt G.A.A. Soil displacement auger head for installing piles in the soil. Patent US 5722498, Int. Cl. E21B 7/26. Appl. No.: 637747; filed Oct. 28, 1994; date of patent Mar. 3, 1998.
29. Curic J., Cavalcoli P., Biserna E. Device and method for drilling and compacting ground. Patent US 20110305527, Int. Cl. E02D5/36. Appl. No.: US13/160,224; filed Jun 14, 2010; date of patent Aug. 20, 2013. 10 p.

30. Akesaka Toshio Rotary penetration construction method and rotary penetration device. Patent JP 2012-246649 A, Int. Cl. E21D9/06 (2006.01). Appl. 26.05.2011; publ. 13.12.2012. 13 p.

31. 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, pp. 173–180. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_21.

Информация об авторах

Кондаков Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор Передовой инженерной школы двигателестроения и специальной техники «Сердце Урала», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kondakovsv@susu.ru

Подзерко Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; podzerkoav@susu.ru

Асфандияров Марат Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; asfandiaryovma@susu.ru

Гундарев Кирилл Александрович, инженер кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; pioneer03.95@mail.ru

Левшин Игорь Евгеньевич, аспирант кафедры «Автомобили и автомобильный сервис», инженер кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; igor_levshin@mail.ru

Information about the authors

Sergey V. Kondakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Advanced Engineering School of Engine Building and Special Equipment “Heart of the Urals”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kondakovsv@susu.ru

Alexander V. Podzerko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; podzerkoav@susu.ru

Marat A. Asfandiaryov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; asfandiaryovma@susu.ru

Kirill A. Gundarev, engineer of the Department of “Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; pioneer03.95@mail.ru

Igor E. Levshin, postgraduate student of the Department of «Automobile Engineering and Car Service», engineer of the Department of “Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; igor_levshin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; принята к публикации 02.10.2025.

The article was submitted 30.09.2025; accepted for publication 02.10.2025.