

НОВАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Е.И. Кромский, С.В. Жиляев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Изложены основные принципы уплотнения грунтов при устройстве земляного полотна различными механизмами. Представлены конструктивные решения и рассмотрена принципиальная схема конусного раскатчика дорожно-строительных машин для глубокого уплотнения грунтов при возведении земляного полотна. Отмечается, что разрушение дорожного покрытия автомобильных дорог происходит, как правило, в результате деформаций земляного полотна, в большинстве случаев связанных с недоуплотнением грунтов, дефекты земляного полотна зачастую являются следствием нарушений технологий строительного процесса и использования морально устаревшей дорожно-строительной техники. Мелкие нарушения и повреждения перерастают в опасные деформации, что создаёт аварийные ситуации и приводит к существенному снижению и ограничению скоростей движения транспортных средств и, как следствие, к большим экономическим потерям. Сформулированы основные преимущества новой технологии уплотнения с использованием конусообразных раскатчиков. Раскатка – это непрерывный процесс образования коническо-цилиндрической полости путём деформации и уплотнения грунта конусообразным раскатывающим рабочим механизмом. Задача новой техники – создать условия для максимального выхода воздуха из массива уплотняемого материала. Реализуемая при этом технология названа нами *воздухоудаляющей*, а существующая – *воздухозапрессовочной*. Для понимания процесса уплотнения грунта новым рабочим оборудованием рассмотрен силовой баланс между усилием подачи и силами сопротивления внедрению конуса при его погружении. Приведены зависимости для расчета суммарного крутящего момента и мощности привода, которые нужно приложить к ведомому валу, чтобы заставить катиться конусное устройство раскатчика в зависимости от геометрических параметров конусного рабочего органа и физико-механических свойств уплотняемых грунтов. Потребительские свойства нового средства уплотнения значительно выше существующей техники: если толщина уплотняемого слоя грунта в насыпи при существующей технологии не превышает полуметра, то для конусного раскатчика практически не зависит от толщины (высоты) уплотняемого слоя.

После глубокого уплотнения грунта конусным раскатчиком и заполнения образовавшихся котлованов (скважин) более прочным материалом устраняется просадочность земляного полотна за счет повышения плотности, снижения склонности грунта к водонасыщению, т. е. в несколько раз повышается его несущая способность.

Ключевые слова: машины для уплотнения дорожно-строительных материалов, сменный рабочий орган гидравлического экскаватора, конусный раскатчик котлованов.

В текущее время в России есть необходимость развивать экономику внутри страны. Чтобы создать нормальные условия для эффективного развития экономики, необходимо иметь в стране 500...600 км автомобильных дорог на 1 тыс. км² территории. Автодорожная сеть Российской Федерации составляет менее 100 км на 1 тыс. км² территории (для сравнения, в Испании – 260, в Польше – 980, во Франции – 2420 км на 1 тыс. км²) [1].

На период с 2015 по 2020 г. намечается резкий рост протяженности автодорог высоких категорий.

Сегодня дорожная сеть Челябинской области составляет около 26 тыс. км, причем, половина дорог (48 %) находится в ненормативном состоянии. Для того чтобы содержать дороги Челябинской области в соответствии с федеральными техническими нормативами требуется порядка 30 млрд рублей.

Анализируя дефекты поверхности покрытий автодорог, можно, не вдаваясь в глубокий анализ, сформулировать следующий вывод – видимые дефекты проезжей части, в большинстве случаев, заложены в дефектах основания. Главной причиной недолговечности проезжих частей и низкого качества автодорог является строительство дорог с относительно слабым основанием. Бетонное покрытие дороги, опираясь на слабое основание, все дефекты «отражает» на своей поверхности в худшем случае через несколько недель, в лучшем случае – через несколько месяцев.

Норматив определения оптимальной плотности грунта морально устарел, так как стандартное уплотнение грунта в лабораторных условиях производят на приборе СоюздорНИИ (уплотняют ударами груза массой 2,5 кг, падающего с высоты 30 см, и уплотнение производят в три слоя). Для сравнения, в США и ряде других стран масса уплотняющего груза составляет 4,5 кг, высота падения – 45 см, уплотнение образца осуществляют в пять слоев.

Теперь становится понятна причина более высоких показателей качества зарубежных автомобильных дорог за счет получения более высокой оптимальной плотности грунта и соответственно более прочной структуры.

При возведении земляного полотна бульдозерами плотность грунта, укладываемая ими в насыпь, не превышает 0,7...0,8 от оптимальной.

Грунты – это сложная многокомпонентная система (композиционные материалы), свойства которой определяются соотношением составляющих ее фаз: твердых минеральных частиц (Т), жидкообразной фазы (Ж) и газов (Г) [2–4].

Задача уплотнения – сблизить между собой твердые частицы (Т) и удалить максимально возможное количество жидкости (Ж) и воздуха (Г).

При существующей технологии уплотнения (внешняя нагрузка прикладывается к грунту сверху) значительная часть Ж и Г движется *сверху-вниз*, т. е. запрессовывается внутри уплотняемого материала, создавая в конечном итоге неустойчивую, подвижную механическую структуру. Увеличение усилия сжатия (а значит и массы и мощности машин) приводит лишь к увеличению компрессионного сжатия воздуха (Г) и упругому последдействию вплоть до появления перепрессовочных трещин, т. е. приводит к браку работы (разупрочнение) [1, 5–9].

На практике доказано, что для получения наиболее плотной структуры грунта необходимо, чтобы объем защемленного воздуха находился в пределах 4...6 %. При таком объеме воздуха грунт характеризуется минимальными набуханием, морозным пучением, водопроницаемостью, а также максимальным модулем упругости и сопротивлением сдвигу. Если объем защемленного воздуха более 6 %, то структура грунта становится неустойчивой и под действием эксплуатационных нагрузок доуплотняется и дает осадку [1].

При уплотнении катками на пневмошинах предел прочности составляет: песков и супесей 3...4, легких суглинков 4...6, тяжелых суглинков 6...8, глин 8...10 Па.

Задача новой технологии – создать условия для максимального выхода воздуха из массива уплотняемого материала. Такая технология названа нами *воздухоудаляющей*, а существующая – *воздухозапрессовочной*.

Грунтово-гидрологические условия по длине трассы, как правило, неоднородны, изменяются и параметры земляного полотна, что обуславливает необходимость использования разнотипных дорожно-строительных машин для возведения земляного полотна [5, 10–20].

Возведение земляного полотна на высокопористых водонасыщенных грунтах создает строителям дополнительные сложности, в результате чего средняя стоимость 1 км земляного полотна в 3...5 раз выше, чем в обычных условиях. Несмотря на научные разработки (МАДИ, СоюздорНИИ, БелдорНИИ, ЮУрГУ и др.), технический уровень строительства дорог на слабонесущих грунтах повышается медленно.

Несущая способность грунтов определяется множеством факторов и, прежде всего, их плотностью (рис. 1).

Сравнение коэффициентов уплотнения материалов, К:

– по существующей технологии – $K = 0,96 - 0,99$;

– по новой технологии – $K = 1,05 - 1,1$.

Усиленное уплотнение (1,05...1,1) позволит уменьшить расходы на строительство дорожной одежды.

Слабонесущие грунты необходимо уплотнять, либо вычерпывать и вывозить, заполняя его объем привозным грунтом – это трудозатратные и не всегда удовлетворяющие качеству производственных работ существующие методы.

В строительном производстве известны способы устройства котлованов и скважин без выемки грунта. При этом используются механизмы (рабочие органы машин) в виде массивных многотонных падающих грузов конусообразной формы, либо винтовых раскатчиков.

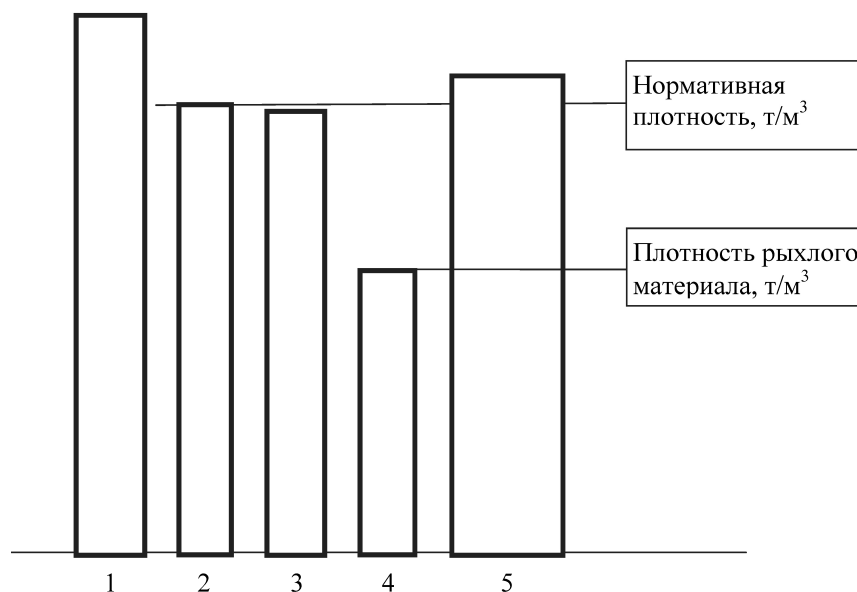


Рис. 1. Сравнение плотности грунтов на разных технологических переделах: 1 – теоретическая плотность; 2 – норматив (лаб. эталон); 3 – фактически реализуемая плотность; 4 – плотность исходного (неуплотненного) материала; 5 – плотность уплотненного материала по новой технологии

Первый способ использует простые конструкции, но малопроизводителен. Второй способ более производителен, но конструкция винтового раскатчика (а это фактически вал-штопор с несколькими коническими катками разного диаметра) сравнительно сложна и требует специальных защитных устройств (уплотнителей) от попадания абразивных частиц грунта в многочисленные подшипниковые опоры катков во время их работы.

ЮУрГУ предлагает устройство для раскатки котлованов, сочетающее в себе преимущества известных технических решений и сведенные к минимуму перечисленные выше недостатки.

Устройство (предложение ЮУрГУ) содержит рабочий орган 1, мотор 2, траверсу 3, гидравлический экскаватор (рис. 2).

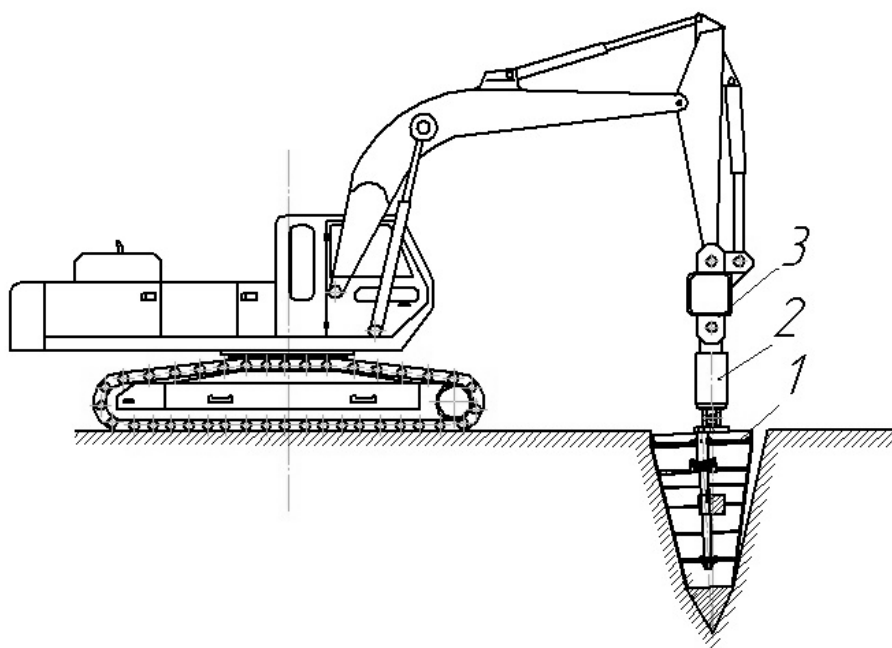


Рис. 2. Конусный раскатчик на базе гидравлического экскаватора

Рабочий орган (рис. 3) содержит конусообразную оболочку (корпус) 4, подшипниковые опоры 5 и 6, коленчатый вал 7, противовес 8, шнек 9.

Поперечные размеры котлована (рис. 4) больше диаметра рабочего органа на величину, равную двум эксцентриситетам коленчатого вала, так как радиус кривошипа коленчатого вала равен его эксцентриситету.

Работа устройства осуществляется в следующей последовательности.

Оператор экскаватора при помощи стрелы и рукояти ориентирует устройство на объект воздействия, т. е. опускает рабочий орган на грунт в вертикальном положении. Включает в работу мотор 2, который приводит во вращение коленчатый вал 7 рабочего органа 1.

Под действием собственного веса рабочего органа 1 и навесного оборудования экскаватора (стрела, рукоять) рабочий орган вдавливается в неуплотнённый грунт. При работе на сравнительно плотных грунтах оператор включает гидроцилиндры стрелы для принудительного вдавливания рабочего органа в грунт. Вытесненный из котлована грунт размещается в окружающем грунтовом массиве, образуя вокруг стенок котлована зону уплотнения.

Вращающийся коленчатый вал 7 через подшипниковые опоры 5 и 6 последовательно прижимает образующие конусов рабочего органа 1 к боковой поверхности котлована, перемещая при этом частицы грунта из области максимального давления в сторону неуплотнённого грунта, т. е. в сторону массива грунта.

Винтообразные лопасти шнека 9 ввинчивают рабочий орган 1 в массив грунта на необходимую глубину.

При противоположном вращении (реверсе) коленчатого вала 7 рабочий орган 1 легко извлекается из котлована.

Для уменьшения вибрационных нагрузок на коленчатом валу смонтирован противовес 8.

Подшипниковые узлы 5 и 6 располагаются внутри монолитного корпуса 4, а торец конусообразной оболочки не контактирует с грунтом, поэтому в данном случае не требуются специальные уплотняющие устройства.

Предложенный вариант винтового раскатчика обеспечивает уплотнение грунта конусообразным корпусом при его осевом перемещении за счет погружения винтовых рабочих элементов, развивающих необходимое тяговое усилие.

Винтовой раскатчик представляет собой два конструктивных элемента: 1) конусный роликовый раскатчик и 2) винтовую конусную резьбу.

На рис. 4 показано, что максимальный зазор между стенкой котлована и корпусом рабочего органа равен двум эксцентриситетам вращающегося коленчатого вала: $D - d = 2e$, где D – диаметр котлована, d – диаметр рабочего органа, e – эксцентриситет коленчатого вала. Наличие постоянного зазора обеспечивает благоприятные условия для выхода воздуха из уплотняемой зоны грунта, способствуя тем самым лучшим условиям уплотнения.

Конструктивной особенностью предлагаемого устройства является требование: оси участков коленчатого вала должны пересекаться в точке, совпадающей с вершиной конуса рабочего органа. В этом случае предотвращается рыскание вершины конуса рабочего органа во время работы устройства, и вершина конуса перемещается в пространстве строго по вертикали.

Предлагаемое устройство выполнено в виде одного закрытого блока, не требует специальных уплотнительных устройств, проще в изготовлении и техническом обслуживании, что в конечном итоге приведет к более высокой надежности работы, чем у известных конструкций.

Для понимания процесса уплотнения грунта новым рабочим оборудованием необходимо

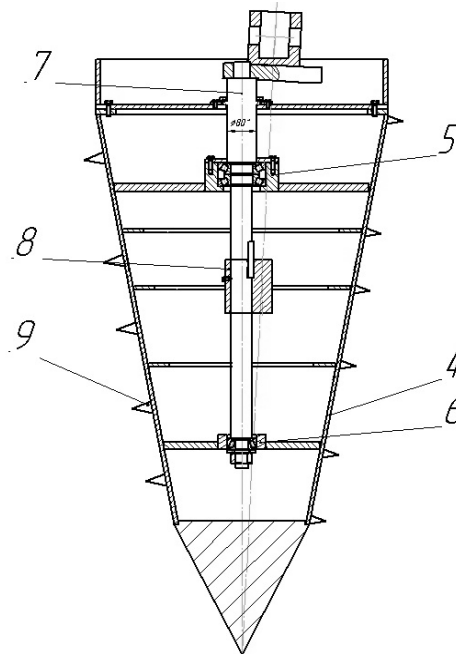


Рис. 3. Рабочий орган конусного раскатчика

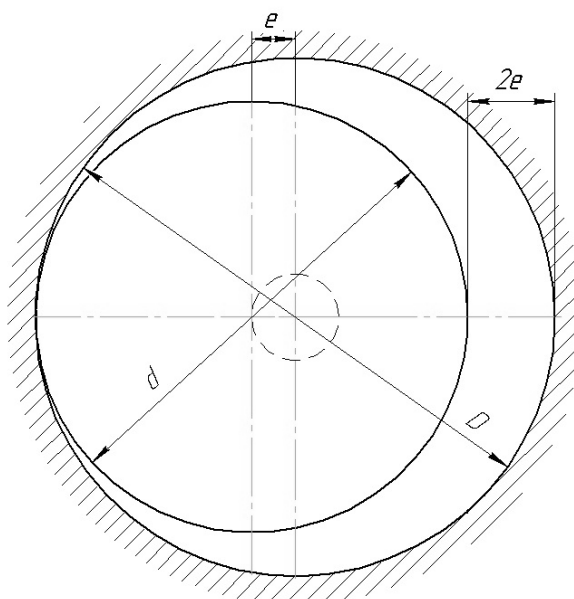


Рис. 4. Схема раскатки котлована (вид сверху)

$$H = d/2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha/2 = 0,4 \cdot 3,73 = 1,5 \text{ м.}$$

Если радиус кривошипа приводного коленчатого вала равен 50 мм, тогда диаметр формируемого котлована на верхней отметке составит 900 мм.

Рассмотрим качение раскатчика диаметром 800 мм по окружности диаметром 900 мм (внутренняя обкатка). Разность длин окружностей составляет 3,14 (900 – 800) = 314 мм, т. е. происходит относительное вращение конусного раскатчика. Полный оборот раскатчика завершится за 9 оборотов коленчатого вала:

$$3,14 \cdot 900 / 314 = 9.$$

Если на внешней поверхности раскатчика изготовить конусную резьбу с шагом 100 мм, то самозавинчивание на глубину 1500 мм произойдет за 135 оборотов коленчатого вала:

$$9 \cdot 1500 / 100 = 135.$$

При скорости вращения коленчатого вала 270 об/мин время погружения раскатчика на всю высоту составит:

$$135 / 270 = 0,5 \text{ мин.}$$

Время рабочего цикла изготовления одного котлована составит примерно 1 мин.

Уплотненная полоса имеет ширину 1800 мм, а при двухмодульном раскатчике – 3600 мм. За смену двухмодульный раскатчик уплотняет полосу 3,6 м на длине 0,8 км.

Конструктивно новый рабочий орган раскатчика грунта может быть выполнен в виде:

- 1) гладкого конуса (прямолинейная образующая);
- 2) гладкого конуса (ломаная образующая);
- 3) многоконусного с гладким забурником;
- 4) многоконусного раскатчика с винтовым забурником;
- 5) гладкого конуса со шнеком на внешней поверхности.

Рассмотрим конус с углом при вершине α , вершина которого пересекается с осью приводного вала. При вращении вала образующие конуса последовательно друг за другом касаются обрабатываемой поверхности материала.

Ранее [3] было показано, как подсчитать суммарный крутящий момент, который нужно приложить к валу (водилу), чтобы заставить катиться конусное устройство

$$M = 0,266 \cdot Q \cdot 1,55 \sqrt{1 - \sigma^2} / E \cdot \tan \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

где Q – внешняя сила, приложенная к вертикальной оси водила; σ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости композиционных уплотняемых материалов (в данном случае грунт).

рассмотреть силовой баланс между усилием подачи P_n и силами сопротивления внедрению конуса при его погружении.

Условие силового баланса определяется следующей зависимостью:

$$P_n = P_1 + P_2,$$

где P_1 – сила сопротивления грунта сжатию; P_2 – сила трения грунта по поверхности конуса.

Силы сопротивления грунта уплотнению зависят от угла заострения конуса и физико-механических свойств грунта. Саратовские исследователи [2] определили минимальную энергоёмкость процесса внедрения конуса и наименьший крутящий момент для внедрения конусной штанги в мерзлый грунт до значения предела его прочности при рациональном угле заострения $\alpha = 25\text{--}30^\circ$.

Для конусного раскатчика примем угол при вершине конуса $\alpha = 30^\circ$, диаметр окружности в основании конуса конструктивно примем равным 0,8 м, тогда высота конуса будет равна

Теперь можно найти мощность привода, необходимую для вращения водила конусного устройства

$$M = M\omega = M\pi n / 30, \quad (2)$$

где n – число оборотов вала (водила) в минуту.

Опытами доказано, что несущая способность земляного полотна с уплотненными стенками вертикальных конусообразных скважин повышается в 2...2,5 раза [4].

Последовательность выполнения работ (рис. 5):

- 1) раскатка котлованов (скважин) в шахматном порядке;
- 2) засыпка котлованов новым грунтом (песком, щебнем);
- 3) отсыпка слоя материала по всей подготовленной поверхности;
- 4) уплотнение насыпного материала.

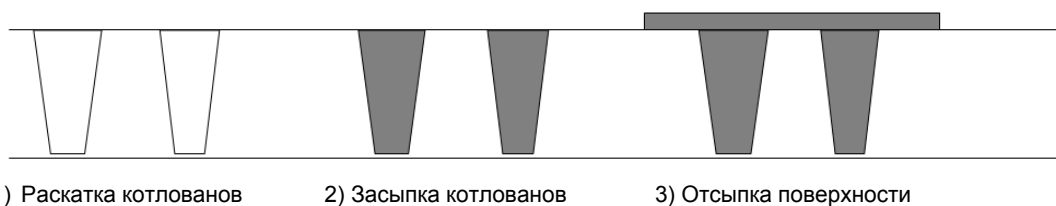


Рис. 5. Последовательность устройства земляного полотна

Таким образом, конусное устройство для раскатки котлованов (скважин) возможно изготавливать не только на машиностроительных заводах, но и на ремонтно-эксплуатационных базах дорожно-строительных организаций, поэтому министерству дорожного хозяйства и транспорта Челябинской области необходимо уже в ближайшее время переходить на новую технику и технологию, высвобождая миллиарды рублей на строительство новых дорог, а не на ремонты дорог низкого качества.

Выводы

1. Предлагаемая техника и технология уплотнения грунтов создает благоприятные условия для миграции воздуха из уплотняемого материала независимо от толщины обрабатываемого слоя.

2. Потребительские свойства нового средства уплотнения значительно выше существующей техники: если толщина уплотняемого слоя грунта в насыпи при существующей технологии ограничивается 0,3...0,45 м, то для конусного раскатчика практически не зависит от толщины (высоты) уплотняемого слоя.

3. После глубокого уплотнения грунта конусным раскатчиком и заполнением образовавшихся котлованов (скважин) более прочным материалом устраняется просадочность земляного полотна за счет повышения плотности, снижения склонности грунта к водонасыщению, т. е. в несколько раз повышается его несущая способность.

4. Новая техника и технология уплотнения грунтов позволит повысить эффективность строительного производства при возведении земляного полотна особенно на высокопористых и других слабонесущих грунтах.

5. Внедрение предложенных ЮУрГУ техники и технологии обеспечит народному хозяйству значительное увеличение комплексного показателя – это тонно-километры перевозимого груза, за счет повышения допустимой нагрузки на ось транспортных средств и увеличения скорости движения за счет улучшения ровности поверхности эксплуатируемых дорог.

Литература

1. Цупикова, С.Г. *Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог: справ. / под ред. С.Г. Цупикова.* – М.: Инфра-Инженерия, 2005. – 928 с.
2. Мартюченко, И.Г. *Выбор рациональных размерно-геометрических параметров мерзлотерохлительного оборудования / И.Г. Мартюченко, С.В. Иванов // Строит. и дорож. машины.* – 2015. – № 7. – С. 49–51.
3. *Разработка теории расчета основных параметров импульсно-волнового прессования композиционных материалов: отчет НИР, ч. II / ВНИЦентр.* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. – № ГР-01.980004703. – Инв. № 02.990003671.

Расчет и конструирование

4. Миронов, В.С. Технология и оборудование для глубокого трамбования грунта / В.С. Миронов, П.Я. Фадеев, В.Я. Фадеев, М.С. Мандрюк // *Строит. и дорож. машины*. – 2015. – № 8. – С. 2–4.
5. Луцкий, С.Я. Интенсивная технология упрочнения слабых оснований земляного полотна / С.Я. Луцкий, А.Б. Сакун // *Транспорт. стр-во*. – 2015 – № 8. – С. 18–22.
6. Lutskiy, S.Y. Coposite / S.Y. Lutskiy, T.V. Shepitko, A.M. Cherkasov // *Cold Regions Science and Technology*. – 2013. – Vol. 5. – P. 577–581.
7. Raifhel, M. Geotextile – Encased Columns (GEC) for Foundation of a Dyke on very Soft Soils / Raifhel M. [et al.] // *Proc. 7th Intern. Conf. on Geosynthetics*. – Nizza, 2006. – P. 1025–1028.
8. Chang, J.C. Distribution laws of abutment pressure around fully mechanized top-coal caving face by in-situ measurement / J.C. Chang // *Journal of Coal Science and Engineering*. – 2011. – Vol. 17. – № 1. – P. 1–5.
9. Gao, F. Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC Trigon approach / F. Gao, D. Stead, J. Coggan // *Computers and Geotechnics*. – 2014. – Vol. 55. – P. 448–460.
10. Shabanimashcool, M. A numerical study of stress changes in barrier pillars and a border area in a longwall coal mine / M. Shabanimashcool, C.C. Li // *International Journal of Coal Geology*. – 2013. – Vol. 106. – P. 39–47.
11. Measurements of in situ stress and mining-induced stress in Beiminghe Iron Mine of China / Z.-H. Ouyang, C.-H. Li, W.-C. Xu, H.-J. Li // *Journal of Central South University of Technology*. – 2009. – Vol. 16. – № 1. – P. 85–90.
12. Relevance between abutment pressure and fractal dimension of crack network induced by mining / M. Gao, W. Jin, Z. Dai, J. Xie // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2013. – Vol. 23. – № 6. – P. 925–930.
13. Side abutment pressure distribution by field measurement / L.-G. Wang, Y. Song, X.-H. He, J. Zhang // *Journal of China University of Mining and Technology*. – 2008. – Vol. 18. – № 4. – P. 527–530.
14. Zhang, C. Theoretical and regressive analysis of the position of peak stress on fully mechanized caving mining / C. Zhang, Z.Y. Ti, Z.X. Li // *China Safety Science Journal*. – 2011. – Vol. 21. – № 9. – P. 88–93.
15. Distribution pattern of front abutment pressure of fully-mechanized working face of soft coal isolated island / W. Xu, E. Wang, R. Shen et al. // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2012. – Vol. 22. – № 2. – P. 279–284.
16. Qin, Z.C. Abutment stress distribution and its transfer law in floor of deep isolated fully-mechanized mining face using sublevel caving / Z.C. Qin, T.X. Wang // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. – 2004. – Vol. 23. – № 7. – P. 1127–1131.
17. Hualei, Z. Distribution of lateral floor abutment pressure in a stope // Z. Hualei, W. Lianguo, S. Jian // *Mining Science and Technology*. – 2011. – Vol. 21. – № 2. – P. 217–221.
18. Whittaker, B.N. Appraisal of strata control practice: discussion on by BN Whittaker, and authors reply / B.N. Whittaker, E.L. Potts // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. – 1974. – Vol. 11. – № 11. – P. 225.
19. Study of the lead abutment pressure distribution base on microseismic monitoring / Y.-X. Xia, H. Lan, D.-B. Mao, J.-F. Pan // *Journal of China University of Mining and Technology*. – 2011. – Vol. 40. – № 6. – P. 868–873.
20. Studying the stress redistribution around the longwall mining panel using passive seismic velocity tomography and geostatistical estimation / N. Hosseini, K. Oraee, K. Shahriar, K. Goshtasbi // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2013. – Vol. 6. – № 5. – P. 1407–1416.

Кромский Евгений Ильич, Кандидат технических наук, доцент кафедры «Колёсные, гусеничные машины и автомобили», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, ekromskiy@mail.ru.

Жиляев Сергей Владимирович, студент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Jilaev@rambler.ru.

Поступила в редакцию 30 марта 2016 г.

NEW TECHNOLOGY FOR SEALS SUBGRADE

E.I. Kromsky, ekromskiy@mail.ru,
S.V. Zhilyaev, jilaev@rambler.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The basic principles of soil compaction at the device subgrade different mechanisms. Presented designs and considered the concept cone compactor road-building machinery for deep soil compaction during the construction of the roadbed. It is noted that the destruction of the pavement roads usually occurs as a result of deformations of the subgrade, in most cases related to honeycombed soil subgrade defects are often caused by violations of the construction process technology and the use of obsolete road-building equipment. Minor violations and damage to develop into dangerous strain that creates emergency situations and leads to a significant reduction and speed limits of vehicles and, consequently, to large economic losses. The basic advantages of the new compression technology with tapered compactors. Unrolling – it is a continuous process of formation of a conical-cylindrical cavity by deformation and the rolling compaction tapered working mechanism. The challenge of new technology – to create the conditions for maximum air output from the array of material being compacted. Realized with technology called us venting and existing – compressed air. To understand the soil compaction process new work equipment is considered a power balance between the force feeding and resistance forces the introduction of the cone when it is immersed. The dependences for the calculation of the total torque and driving power, which must be applied to the driven shaft to force the device to roll tapered compactor depending on the geometric parameters of a conical working body and the physical and mechanical properties of compacted soil. New consumer properties much higher sealing means of the prior art, if the thickness of the compacted soil layer into the mound with existing technology is not exceeds two feet, then the cone compactor hardly depends on the thickness (height) packed layer.

After deep compaction compactor cone and fill the pits (holes) is more durable material removed subgrade subsidence due to increase density, reduce soil tendency to water saturation, i.e., several times increases its load-bearing capacity.

Keywords: machine to compact road-building materials, interchangeable working body of the hydraulic excavator, tapered compactor pits.

References

1. Cupikov S.G. *Stroitel'stvo, ekspluatatsiya i remont avtomobi'nykh dorog* [Construction, Operation and Repair of Highways]. Moscow, Infra-Inzheneriya, 2005. 928 p.
2. Martuychenko I.G., Ivanov S.V. [Choice of Rational Dimensions, Geometric Parameters of Permafrost Ripping Equipment]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2015, no. 7, pp. 49–51. (in Russ.)
3. *Razrabotka teorii rascheta osnovnykh parametrov impul'sno-volnovogo pressovaniya kompozitsionnykh materialov. Otchet NIR ch.II* [The Development of the Theory of Calculation of Main Parameters of Pulse-Wave Compression of Composite Materials]. No. GR-01.980004703. Inv. no. 02.990003671; Cheljabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 1999.
4. Mironov V.S., Fadeev P.Ya., Fadeev V.Ya., Mandrik M.S. [Technology and Equipment for Deep Soil Compaction]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2015, no. 8, pp. 2–4. (in Russ.)
5. Luckiy S.Ya., Sakun A.B. [Intensive Technology of Hardening of Weak Bases Subgrade]. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2015, no. 08, pp. 18–22. (in Russ.)
6. Lutskiy S.Y., Shepitko T.V., Cherkasov A.M. Coposite. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, vol. 5, pp. 577–581.
7. Raifhel M. Geotextile – Encased Columns (GEC) for Foundation of a Dyke on very Soft Soils. *Proc. 7th Intern. Conf. on Geosynthetics*, Nizza, 2006. pp. 1025–1028.
8. Chang J.C. Distribution Laws of Abutment Pressure Around Fully Mechanized Top-Coal Caving Face by in-Situ Measurement. *Journal of Coal Science and Engineering*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 1–5. DOI: 10.1007/s12404-011-0101-9

9. Gao F., Stead D., Coggan J. Evaluation of Coal Longwall Caving Characteristics Using an Innovative UDEC Trigon Approach. *Computers and Geotechnics*, 2014, vol. 55, pp. 448–460. DOI: 10.1016/j.compgeo.2013.09.020
10. Shabanimashcool M., Li C.C. A Numerical Study of Stress Changes in Barrier Pillars and a Border Area in a Longwall Coal Mine. *International Journal of Coal Geology*, 2013, vol. 10, pp. 39–47. DOI: 10.1016/j.coal.2012.12.008
11. Ouyang Z.-H., Li C.-H., Xu W.-C., Li H.-J. Measurements of in Situ Stress and Mining-Induced Stress in Beiminghe Iron Mine of China. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, vol. 16, no. 1, pp. 85–90. DOI: 10.1007/s11771-009-0014-6
12. Gao M., Jin W., Dai Z., Xie J. Relevance between Abutment Pressure and Fractal Dimension of Crack Network Induced by Mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, vol. 23, no. 6, pp. 925–930. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.11.008
13. Wang L.-G., Song Y., He X.-H., Zhang J. Side Abutment Pressure Distribution by Field Measurement. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, vol. 18, no. 4, pp. 527–530. DOI: 10.1016/S1006-1266(08)60288-6
14. Zhang C., Ti Z.Y., Li Z.X. Theoretical and Regressive Analysis of the Position of Peak Stress on Fully Mechanized Caving Mining. *China Safety Science Journal*, 2011, vol. 21, no. 9, pp. 88–93.
15. Xu W., Wang E., Shen R., Song D.Z., Zhang J.M. Distribution Pattern of Front Abutment Pressure of Fully-Mechanized Working Face of Soft Coal Isolated Island. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012, vol. 22, no. 2, pp. 279–284. DOI: 10.1016/j.ijmst.2012.03.007
16. Qin Z.C., Wang T.X. Abutment Stress Distribution and Its Transfer Law in Floor of Deep Isolated Fully-Mechanized Mining Face Using Sublevel Caving. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, vol. 23, no. 7, pp. 1127–1131.
17. Hualei Z., Lianguo W., Jian S. Distribution of Lateral Floor Abutment Pressure in a Stope. *Mining Science and Technology*, 2011, vol. 21, no. 2, pp. 217–221. DOI: 10.1016/j.mstc.2011.02.010
18. Whittaker B.N., Potts E.L. Appraisal of Strata Control Practice: Discussion on by BN Whittaker, and Authors Reply. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1974, vol. 11, no. 11, 225 p. DOI: 10.1016/0148-9062(74)90545-2
19. Xia Y.-X., Lan H., Mao D.-B., Pan J.-F. Study of the Lead Abutment Pressure Distribution Base on Microseismic Monitoring. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2011, vol. 40, no. 6, pp. 868–873.
20. Hosseini N., Oraee K., Shahriar K., Goshtasbi K. Studying the Stress Redistribution Around the Longwall Mining Panel Using Passive Seismic Velocity Tomography and Geostatistical Estimation. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, vol. 6, no. 5, pp. 1407–1416. DOI: 10.1007/s12517-011-0443-z

Received 30 March 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кромский, Е.И. Новая техника для уплотнения земляного полотна / Е.И. Кромский, С.В. Жилиев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 14–22. DOI: 10.14529/engin160202

FOR CITATION

Kromsky E.I., Zhilyaev S.V. New Technology for Seals Subgrade. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 14–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin160202
