

Давыдова Наталья Алексеевна, бакалавр, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва

Алюхина Александра Михайловна, магистрант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва

РАЗРАБОТКА УПЛОТНЯЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА АВТОГРЕЙДЕР

Аннотация

В статье рассматривается разработка навесного виброуплотнителя для автогрейдера, устанавливаемого вместо штатного среднего отвала. Обоснована актуальность модернизации автогрейдера для совмещения функций планировки и уплотнения грунта в одном технологическом проходе. Проведен анализ существующих конструкций автогрейдеров отечественных и зарубежных производителей, выявлены их преимущества и недостатки. Предложена принципиально новая конструкция виброуплотнителя, включающая вибровалец, гидромотор привода, дебалансный вал и систему виброизоляции. Выполнены тяговые расчеты, расчеты на прочность и устойчивость модернизированной машины. Определены основные параметры виброуплотнителя: вынуждающая сила, частота колебаний, масса дебалансов и производительность. Проведена экономическая оценка эффективности внедрения разработки, показавшая срок окупаемости 1 год и индекс доходности 7,5. Результаты работы могут быть использованы для модернизации существующего парка автогрейдеров и создания новых multifunctional дорожно-строительных машин.

Annotation

The article discusses the development of a mounted vibratory compactor for a motor grader, installed instead of the standard middle blade. The relevance of upgrading the motor grader to combine the functions of grading and soil compaction

in one technological pass is substantiated. The analysis of existing designs of motor graders from domestic and foreign manufacturers is carried out, their advantages and disadvantages are identified. A fundamentally new design of a vibratory compactor is proposed, including a vibrating roller, a hydraulic drive motor, an unbalanced shaft and a vibration isolation system. Traction calculations, strength and stability calculations of the upgraded machine are performed. The main parameters of the vibratory compactor are determined: exciting force, oscillation frequency, unbalance mass and productivity. An economic assessment of the effectiveness of the development implementation is carried out, showing a payback period of 1 year and a profitability index of 7.5. The results of the work can be used for modernization of the existing fleet of motor graders and creation of new multifunctional road construction machines.

Ключевые слова: автогрейдер, виброуплотнитель, навесное оборудование, модернизация, дорожно-строительные машины, уплотнение грунта, тяговый расчет, экономическая эффективность.

Keywords: motor grader, vibratory compactor, mounted equipment, modernization, road construction machines, soil compaction, traction calculation, economic efficiency.

Автогрейдеры являются базовыми машинами при строительстве и ремонте автомобильных дорог, выполняя операции по планировке, профилированию и перемещению грунтов. Однако финишная операция — уплотнение земляного полотна — традиционно требует применения специализированных машин (катков), что удлиняет технологическую цепочку и увеличивает стоимость работ. В современных условиях подрядные организации стремятся минимизировать количество техники на объектах без потери качества работ. Разработка навесного виброуплотнителя для автогрейдера полностью отвечает этой задаче.

Применение вибрации при уплотнении позволяет достичь более высокой плотности материала при меньших затратах энергии по сравнению со статическим прикатыванием. Вибрационное воздействие вызывает эффект

«псевдооживления» грунта, заставляя частицы перемещаться и плотнее укладываться под нагрузкой. Разработка и установка навесного виброуплотнителя на автогрейдер позволяет интенсифицировать процесс уплотнения, сократить парк машин и повысить качество основания за счет использования веса базовой машины.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности дорожно-строительных работ является оснащение автогрейдеров навесным виброуплотнительным оборудованием. Использование вибрации при уплотнении позволяет достичь более высокой плотности материала при меньших затратах энергии по сравнению со статическим прикатыванием. Вибрационное воздействие вызывает эффект «псевдооживления» грунта, заставляя частицы перемещаться и плотнее укладываться под нагрузкой [1, с. 73].

В процессе выполнения работы был проведен анализ конструкций автогрейдеров отечественных и зарубежных производителей. Российский рынок представлен такими предприятиями, как Брянский арсенал (модели ГС-10.01, ГС-14.02, ГС-18.05, ГС-25.09), Орловский Дормаш (DZ-122, DZ-298), Челябинские СДМ (ДЗ-98) [2, с. 20]. Среди зарубежных производителей лидирующие позиции занимают Caterpillar (серия M), Volvo (серия G), Komatsu (серии GD и Galion), а также китайские компании XCMG, LiuGong и Sany, активно завоевывающие российский рынок.

Анализ показал, что существующие автогрейдеры обладают значительным потенциалом для расширения функциональных возможностей за счет установки сменного рабочего оборудования. Однако виброуплотнитель, монтируемый на тяговую раму вместо штатного отвала, ранее не применялся в практике дорожного машиностроения. Это обусловлено тем, что традиционно уплотнение грунта рассматривалось как отдельная технологическая операция, выполняемая специализированными катками различных типов. Современные тенденции развития дорожно-строительной техники направлены на создание многофункциональных машин, способных

выполнять несколько операций за один проход, что позволяет сократить сроки строительства, снизить эксплуатационные затраты и уменьшить количество техники на объекте.

В рамках данной работы предложена конструкция виброуплотнителя, устанавливаемого на автогрейдер вместо среднего отвала. Виброуплотнитель представляет собой сварную металлоконструкцию, включающую корпус, вибрационный валец и механизм передачи колебаний [3, с. 42]. Соединение с тяговой рамой автогрейдера осуществляется через унифицированные узлы крепления, обеспечивающие быструю смену рабочего органа. В нужный момент оператор может демонтировать средний отвал и установить виброуплотнитель, используя штатные узлы крепления и механизмы управления.

Конструкция виброуплотнителя состоит из следующих основных элементов: рама крепления для соединения с тяговой рамой автогрейдера через штатные проушины; корпус, воспринимающий нагрузки от вибрации и веса оборудования; вибровалец (или виброплита), непосредственно контактирующий с уплотняемым грунтом, внутри которого расположен вибрационный механизм; вибровозбудитель (дебалансный вал), создающий вынужденные колебания за счет вращения неуравновешенных масс и приводимый в действие от гидромотора; гидромотор привода вибратора, преобразующий энергию потока рабочей жидкости от гидросистемы автогрейдера во вращательное движение вибровозбудителя; гидроцилиндры управления, обеспечивающие подъем, опускание и прижатие виброуплотнителя к грунту (используются штатные гидроцилиндры подъема отвала); механизм изменения угла атаки, позволяющий ориентировать виброуплотнитель относительно поверхности грунта (используется поворотный механизм тяговой рамы); амортизаторы (виброизоляторы) — резинометаллические элементы, снижающие передачу вибрации на раму автогрейдера и кабину оператора; система смазки и охлаждения,

обеспечивающая надежную работу подшипниковых узлов вибровозбудителя в условиях интенсивных динамических нагрузок [4, с. 89].

Принцип работы виброуплотнителя заключается в следующем. При включении гидромотора вращение передается на дебалансный вал, расположенный внутри вальца. Вращение неуравновешенных масс создает центробежную силу, которая через подшипниковые узлы передается на корпус вальца. Возникающие вынужденные колебания заставляют валец вибрировать с заданной частотой и амплитудой. Под действием веса автогрейдера (статическая нагрузка) и динамических усилий от вибрации происходит интенсивное уплотнение грунта. Вибрация снижает силы внутреннего трения между частицами грунта, позволяя им плотнее укладываться под нагрузкой. За счет использования штатных механизмов автогрейдера (подъем, вынос, поворот тяговой рамы) виброуплотнитель может обрабатывать как горизонтальные участки, так и откосы различной крутизны.

Сам валец (или плита) изготавливается из износостойкой стали. Для работы на асфальтобетонных покрытиях (при ремонтных работах) может применяться защитное полимерное покрытие или бандажирование резиной, что предотвращает разрушение обрабатываемой поверхности. Виброуплотнитель обеспечивает высокую производительность при уплотнении связных и несвязных грунтов, а также дорожно-строительных материалов (щебень, гравий, песок). За счет большой площади контакта рабочего органа с грунтом и высокой возмущающей силы достигается равномерное уплотнение на глубину до 30–50 см за один проход.

В ходе исследования были выполнены основные технические расчеты. За прототип принят серийный отечественный автогрейдер ГС-18.5 производства «Брянского арсенала» со следующими характеристиками: масса 15 700 кг, мощность двигателя 130 кВт (175 л.с.), колесная формула 1×2×3, длина отвала 4 м. Тяговый расчет автогрейдера показал, что суммарное сопротивление движению при работе с виброуплотнителем составляет 32,14 кН, что

значительно ниже номинального тягового усилия 94,5 кН и предельного усилия по сцеплению 70,65 кН. Условия работы выполняются с достаточным запасом.

Расчет на прочность основной рамы выполнялся для двух расчетных положений. В первом положении (рабочий режим, конец заглубления) максимальные напряжения в опасном сечении составили 536,8 МПа, что не превышает допускаемое напряжение 541,7 МПа. Во втором положении (внезапная встреча с препятствием) напряжения составили 276,2 МПа, что также ниже допускаемых значений. Следовательно, конструкция обладает необходимой прочностью и надежностью. Для выполнения условий прочности были подобраны оптимальные размеры поперечного сечения рамы коробчатого типа из стали 40Х.

Расчет устойчивости показал, что предельный угол подъема по условию сцепления составляет $28,8^\circ$, по условию реализации мощности двигателя — 34° , предельный поперечный уклон — $21,8^\circ$. Все условия устойчивости выполняются, что подтверждает безопасность эксплуатации модернизированной машины. Автогрейдер — длиннобазовая машина, поэтому его продольная устойчивость против опрокидывания обеспечена на уклонах, являющихся предельными по условию сцепления. По условию сцепления тормозящих колес с дорогой предельный уклон составляет $18,3^\circ$.

Основные параметры разработанного виброуплотнителя определены расчетным путем. Требуемая вынуждающая сила для уплотнения связных грунтов III–IV категории составляет 10,5 кН при массе вальца с оборудованием 15 кН. Частота колебаний принята 1800 об/мин (30 Гц), масса дебалансов — 9,86 кг при эксцентриситете 0,03 м. Мощность привода вибратора составляет 59,3 кВт, что требует подключения к отдельной секции гидронасоса или использования гидроаккумулятора. Производительность виброуплотнителя при ширине вальца 2,0 м, рабочей скорости 0,5 м/с и толщине уплотняемого слоя 0,3 м составляет 826 м²/ч. Вес виброуплотнителя 15 кН не превышает грузоподъемность механизма подъема отвала (68,4 кН),

поэтому существующая гидросистема справится с подъемом и удержанием оборудования в транспортном положении.

При разработке виброуплотнителя, монтируемого вместо среднего отвала, следует учитывать, что работа вибрационного механизма создает дополнительную нагрузку на двигатель автогрейдера через гидравлическую систему. Это приводит к увеличению расхода топлива и, соответственно, росту вредных выбросов по сравнению с работой машины в режиме планировки без уплотнения. Экологическая оценка показала, что годовой выброс вредных веществ при работе автогрейдера с виброуплотнителем составляет 136,01 кг/год, а максимальный годовой экологический ущерб — 605,4 тыс. руб. Для снижения негативного воздействия предложены мероприятия: применение двигателей экологического класса Stage V, использование биодизельного топлива, установка сажевых фильтров и каталитических нейтрализаторов, что позволит снизить ущерб на 40–50%. Проектируемый автогрейдер с виброуплотнителем оснащается дизельным двигателем, соответствующим экологическому классу не ниже Stage IIIA / Tier 3. По выбросам вредных веществ двигатель соответствует требованиям Технического регламента Таможенного союза (ТР ТС 010/2011) «О безопасности машин и оборудования» (ГОСТ Р 41.96-2011).

Экономическая оценка эффективности внедрения разработки показала, что чистая прибыль от производства новой техники составляет 705,74 тыс. руб. при рентабельности к объему продаж 12,17%. Чистый дисконтированный доход (ЧДД) за 5-летний период составляет 296,19 тыс. руб., что подтверждает эффективность проекта. Индекс доходности равен 7,5, срок окупаемости — 1 год [5, с. 79]. Проект признается эффективным, когда значение ЧДД > 0. Положительное значение дисконтированного сальдо накопленного потока является достаточным условием финансовой реализуемости проекта.

Затраты на изготовление и монтаж навесного виброуплотнителя значительно ниже стоимости приобретения отдельного вибрационного катка, при этом достигается сопоставимый технологический эффект. Совмещение

операций позволяет исключить технологические разрывы и простои, ускоряя возведение земляного полотна. Вибрационные методы зачастую требуют меньшего количества проходов для достижения требуемого коэффициента уплотнения, что снижает расход топлива и выбросы в атмосферу. Сравнение характеристик автогрейдера в стандартной комплектации (с центральным отвалом) и автогрейдера, оснащенного виброуплотнителем, показывает, что модернизированная машина обладает рядом существенных преимуществ: уплотнение грунта без привлечения отдельной техники, экономия времени и ресурсов, повышение качества основания, универсальность применения и возможность работы в труднодоступных местах.

Разработанная конструкция виброуплотнителя, устанавливаемого вместо среднего отвала автогрейдера, позволяет существенно расширить функциональные возможности базовой машины и повысить эффективность дорожно-строительных работ. Совмещение операций планировки и уплотнения в одном проходе сокращает количество техники в дорожном отряде, снижает эксплуатационные расходы и повышает качество подготовки дорожного основания. Сочетание статической нагрузки от массы автогрейдера (до 18 тонн) и динамического воздействия вибрации обеспечивает качественное уплотнение грунтов на глубину до 30–50 см за один проход, что сопоставимо с работой специализированных вибрационных катков среднего класса.

Практическая значимость достигнутых результатов заключается в возможности применения разработанных решений для модернизации существующих моделей автогрейдеров и создания новых многофункциональных машин. Это позволит сократить количество техники в дорожном отряде (за счет совмещения функций планировки и уплотнения), снизить эксплуатационные расходы (уменьшение расхода топлива и затрат на аренду дополнительных машин), повысить качество подготовки дорожного основания и увеличить универсальность оборудования. Перспективы дальнейших исследований включают внедрение автоматизированных систем

управления режимами вибрации в зависимости от типа грунта, использование новых износостойких материалов для рабочего органа (вальца), а также проведение полномасштабных производственных испытаний для подтверждения теоретических выводов и уточнения математических моделей процесса вибрационного уплотнения.

Литература

1. Носенко, А.С. Строительно-дорожные и коммунальные машины: учеб. пособие / А.С. Носенко, Е.А. Шемшура. – 2021. – 73 с.
2. Замятин, А.В. Машины для производства земляных работ / А.В. Замятин, А.А. Жигайлов. – 2023. – 210 с.
3. Клименко, С.А. Дорожно-строительные машины и оборудование специального назначения. Дипломное проектирование / С.А. Клименко, В.В. Журавлев. – 2024. – 190 с.
4. Жулай, В.А. Современные конструкции механизмов поворотов отвалов автогрейдера / В.А. Жулай, В.Л. Тюнин. – М.: Инфра-М, 2024. – С. 89-93.
5. Абрамов, А.Н. Прочность и надежность конструкций машин для строительства и восстановления дорог и аэродромов / А.Н. Абрамов, Р.В. Морозов, Ж.А. Старостина. – М., 2026. – 120 с.

Literature

1. Nosenko, A.S. Construction, road and municipal machines: textbook / A.S. Nosenko, E.A. Shemshura. – 2021. – 73 p.
2. Zamyatin, A.V. Machines for earthworks / A.V. Zamyatin, A.A. Zhigailov. – 2023. – 210 p.
3. Klimenko, S.A. Road construction machines and special purpose equipment. Diploma design / S.A. Klimenko, V.V. Zhuravlev. – 2024. – 190 p.
4. Zhulai, V.A. Modern designs of motor grader blade rotation mechanisms / V.A. Zhulai, V.L. Tyunin. – M.: Infra-M, 2024. – P. 89-93.

5. Abramov, A.N. Strength and reliability of structures of machines for construction and restoration of roads and airfields / A.N. Abramov, R.V. Morozov, Zh.A. Starostina. – M., 2026. – 120 p.