

УДК (UDC) 62-529

АЛГОРИТМ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
ОТВАЛЬНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ АВТОГРЕЙДЕРАTHE ALGORITHM OF THE ENGINEERING METHOD OF PARAMETER
OPTIMIZATION DUMP WORKING EQUIPMENT OF THE MOTOR GRADERИгнатов С.Д.
Ignatov S.D.Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (Омск, Россия)
Siberian State Automobile and Highway University (Omsk, Russian Federation)

Аннотация. Совершенствование рабочих органов дорожно-строительных машин является важной задачей, направленной на повышение их эксплуатационной эффективности, снижение энергозатрат и увеличение ресурса оборудования. Повышающиеся требования к качеству выполнения землеройных работ требуют разработки инженерных методик оптимизации параметров рабочих органов, в частности, отвального оборудования автогрейdera. Это позволит повысить точность планировки грунта, снизить нагрузку на силовую установку и увеличить срок службы конструкции. Оптимизация параметров отвального оборудования представляет собой сложную инженерную задачу, требующую учета множества факторов, включая геометрию отвала, его углы установки, свойства разрабатываемого грунта, динамические нагрузки и энергоэффективность машины. Для решения данной задачи целесообразно использование математического моделирования, численных методов оптимизации и анализа нагрузок. Это позволяет определить рациональные параметры конструкции, минимизировать сопротивление грунта и снизить затраты на топливо. В статье приведены результаты анализа существующих конструкций отвального оборудования автогрейдеров, разработан алгоритм инженерной методики оптимизации, рассмотрены основные этапы его реализации, включая моделирование, итерационные процедуры оптимизации и экспериментальную проверку. Оптимизированные параметры позволяют повысить эффективность эксплуатации машины, снизить затраты и увеличить срок службы оборудования.

Ключевые слова: автогрейдер, отвальное оборудование, тяговое усилие, оптимизация.

Дата получения статьи: 10.03.2025
Дата принятия к публикации: 21.05.2025
Дата публикации: 25.06.2025

Сведения об авторах:

Игнатов Сергей Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная, подъемно-транспортная и нефтегазовая техника», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный ав-

Abstract. The improvement of working units in road construction machinery is a crucial task aimed at enhancing operational efficiency, reducing energy consumption, and extending equipment lifespan. Increasing demands for the quality of earthmoving operations require the development of engineering methods for optimizing the parameters of working units, particularly the blade equipment of motor graders. This optimization helps improve grading accuracy, reduce engine load, and extend the service life of the structure. Optimizing the parameters of blade equipment is a complex engineering challenge that requires considering multiple factors, including blade geometry, installation angles, soil properties, dynamic loads, and machine energy efficiency. To address this issue, it is advisable to use mathematical modeling, numerical optimization methods, and load analysis. These approaches enable the determination of optimal design parameters, minimizing soil resistance and reducing fuel consumption. This paper presents an analysis of existing motor grader blade equipment designs, develops an engineering methodology optimization algorithm, and examines the main stages of its implementation, including modeling, iterative optimization procedures, and experimental validation. The optimized parameters improve machine performance, reduce operational costs, and increase equipment lifespan.

Keywords: motor grader, dump equipment, traction, optimization.

Date of manuscript reception: 10.03.2025
Date of acceptance for publication: 21.05.2025
Date of publication: 25.06.2025

Author's information:

Sergey D. Ignatov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department of «Construction, Lifting, Transport and Oil and Gas Engineering» at Siberian State Automobile and

томобильно-дорожный университет»,
e-mail: ignsd@mail.ru.

ORCID: 0000-0003-1891-8744

† Highway University, e-mail: ignsd@mail.ru.

† ORCID: 0000-0003-1891-8744

†

1. Введение

Современные тенденции в строительном машиностроении направлены на повышение эффективности, надёжности и ресурсоёмкости землеройной техники, включая автогрейдеры, экскаваторы и погрузчики. Существенное влияние на производительность и эксплуатационные характеристики машин оказывает конструкция их рабочего оборудования, что обуславливает необходимость его целенаправленной инженерной оптимизации.

В последние годы исследования в данной области приобрели системный характер. В частности, в [1] рассматривается структурно-конструктивная оптимизация ковша экскаватора с использованием топологического проектирования и конечно-элементного анализа, направленная на снижение массы и повышение прочности. Аналогичный подход применяется в [2], где осуществляется оптимизация конструкции рабочего оборудования экскаватора-погрузчика с учетом динамических нагрузок и усталостной прочности.

Одним из ключевых направлений является применение CAD/CAE-систем и численного моделирования для анализа распределения напряжений в металлоконструкциях. Так, в работе [3] выполнено комплексное моделирование лопаты фронтального погрузчика, позволяющее идентифицировать критические зоны концентрации напряжений и внести изменения в геометрию без увеличения массы конструкции.

Наряду с этим активно развиваются методы оптимизации шарнирных и подвижных соединений, обеспечивающих перемещение рабочего органа. В [4] предложено улучшение компоновки поворотного механизма отвала автогрейдера с учетом усилий в звеньях кинематической схемы, что позволило снизить пиковые нагрузки в рабочих режимах.

Интерес представляют также исследования, направленные на повышение износостойкости и долговечности элементов, контактирующих с разрабатываемой средой. В

[5] исследуется влияние режимов нагружения и конструкции режущей кромки отвала на её износ, предлагаются конструктивные улучшения с применением современных материалов и технологических приёмов.

Значительный вклад в развитие направлений, связанных с оптимизацией конструкций, вносят методы структурной оптимизации с применением эволюционных алгоритмов, позволяющие формировать геометрию деталей на основе заданных ограничений и рабочих условий, что отражено в [6].

Таким образом, оптимизация конструкций рабочего оборудования землеройных машин требует междисциплинарного подхода, сочетающего методы механики, численного анализа, материаловедения и инженерной кибернетики. Повышение эффективности таких решений способствует не только снижению материалоемкости техники, но и увеличению её эксплуатационного ресурса при работе в тяжёлых производственных условиях.

2. Постановка задачи

Исследования, посвященные повышению эффективности автогрейдеров при проведении планировочных работ, указывают на то, что в настоящее время автогрейдеры математически достаточно описаны и значительных изменений в их конструкции в ближайшей перспективе не ожидается.

Повышение эффективности процесса планировки поверхности автогрейдером возможно за счет использования специализированного отвала. Однако, для проектирования такого отвала необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на производительность машины: скорость перемещения, толщину срезаемой стружки, характеристики грунта, геометрические параметры рабочего оборудования и т.п.

Автоматизированные системы проектирования в настоящее время позволяют быстро определять оптимальные параметры строительных и дорожных машин в целом,

как и параметры рабочего оборудования в частности, но для этого необходимо разработать соответствующую инженерную методику [7 - 9].

Объектом исследования в данном случае является рабочий процесс планировки грунтовой поверхности автогрейдером. Предметом исследования является влияние конструктивных параметров отвального оборудования на эффективность планировки автогрейдером.

Системный анализ активно применяется для исследования сложных взаимозависимых проблем. Основанный на понятии системы, он описывает структуру и взаимосвязи компонентов, которые определены и фиксированы. [10]

В данном исследовании системный анализ используется для изучения как новых, так и уже существующих строительных и дорожных машин.

Эти машины рассматриваются как сложные системы, состоящие из взаимосвязанных подсистем. Каждая из этих подсистем обладает своими уникальными свойствами и функционирует согласно определенным математическим моделям [10].

В данной статье рассматривается только взаимодействие рабочего оборудования автогрейдера с грунтом, а именно планировочные работы.

В качестве варьируемых параметров предлагается рассматривать ширину отвала B , высоту отвала H и массу отвала $m_{отв}$. Так как эти параметры взаимосвязаны между собой, задачу оптимизации можно упростить, приняв за основной и единственный варьируемый параметр ширину отвала, зная который, можно определить высоту и массу.

Целевая функция направлена на минимизацию запаса тягового усилия при выполнении автогрейдером планировочных работ. В качестве целевой функции предлагается рассматривать зависимость вида

$$\Delta T(B) = T_{\min} - \sum W(B) \rightarrow 0, \quad (1)$$

где ΔT – запас по силе тяги, Н; $T_{\min}$ – минимальная сила тяги из двух расчетных (по сцеплению и по мощности), Н; $\sum W$ – суммарная сила сопротивления, возни-

кающая при работе автогрейдера, Н; B – ширина отвала автогрейдера, м.

В качестве ограничения при оптимизации необходимо учесть, что минимальная сила тяги $T_{\min}$ должна превышать суммарную силу сопротивления $\sum W$

$$T_{\min} > \sum W(B). \quad (2)$$

Кроме того, нужно убедиться, что ширина отвала будет соответствовать конструктивным особенностям базовой машины

$$B_o \leq B \leq B_{\max}, \quad (3)$$

где $B_{\max}$ – максимальная ширина, при которой возможно использование существующей подвески рабочего оборудования, м; B_o – ширина базового отвала, м

В результате критерий эффективности будет иметь вид

$$\begin{cases} \Delta T(B) = T_{\min} - \sum W(B) \rightarrow 0, \\ T_{\min} > \sum W(B), \\ B_o \leq B \leq B_{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

3. Математическая модель рабочего процесса автогрейдера

В процессе эксплуатации автогрейдера возникают различные силы сопротивления, которые имеют разный характер и разную интенсивность. Для определения сопротивлений, возникающих при работе автогрейдера определенного типа, необходимо знать свойства грунта, его характеристики, размеры отвала и углы его установки, а также вес самого автогрейдера [7 - 9].

Тяговый расчет позволяет оценить возможности тягача при транспортировке грунта с подрезанием стружки. Для нормального протекания процессов резания, перемещения грунта или планирования поверхностей требуются следующие условия.

Первое и основное условие – это проверка тягового усилия соответствующим образом [11]

$$T_{\phi} \geq \sum W, \quad (5)$$

где T_{ϕ} – сила тяги по сцеплению, Н; $\sum W$ – суммарная сила сопротивления, возникающая при работе, Н.

Сила тяги по сцеплению определяется из следующих параметров [11]

$$T_{\varphi} = (m_{\text{бм}} + m_{\text{ро}}) \cdot g \cdot \varphi_{\text{сц}}, \quad (6)$$

где $m_{\text{бм}}$ – вес базовой машины, кг; $m_{\text{ро}}$ – вес рабочего оборудования (отвала), кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\varphi_{\text{сц}}$ – коэффициент сцепления движителя с грунтом.

Следующим условием является проверка тягового усилия по мощности [11]

$$T_H \geq \sum W, \quad (7)$$

где T_H – сила тяги, определяемая мощностью двигателя, Н.

Сила тяги по мощности двигателя определяется [11]

$$T_H = 3600 \cdot \frac{N}{V} \cdot \eta, \quad (8)$$

где N – эффективная мощность двигателя, кВт; V – скорость машины, м/с; η – КПД привода машины.

Суммарная сила сопротивления, возникающая при работе автогрейдера, состоит из нескольких составляющих

$$\sum W = W_p + W_{np} + W_{\text{го}} + W_{\text{одо}} + W_{\kappa}, \quad (9)$$

где W_p – сила сопротивления грунта резанию, Н; W_{np} – сила сопротивления перемещению призмы волочения, Н; $W_{\text{го}}$ – сила сопротивления от движения грунта вверх по отвалу, Н; $W_{\text{одо}}$ – сила сопротивления от движения грунта вдоль по отвалу, Н; W_{κ} – сила сопротивления перекачиванию колес, Н.

Силы инерции считают нулевыми, предполагая, что автогрейдер движется без ускорения и переключения скоростей, то есть находится в состоянии установившегося движения.

После получения результата суммарной силы сопротивления, выбираем минимальное значение между результатами тягового усилия по мощности и силой тяги по сцеплению. По результатам сравнения делаем проверку неравенства между минимальной силой тяги и суммарной силой сопротивления $T_{\min} \geq \sum W$.

Ширину базового отвала автогрейдера мы можем получить из формулы

$$B_{\text{о}} = (0,7 \dots 0,76) \cdot \sqrt{m_a} + 1,2, \quad (10)$$

где m_a – масса автогрейдера, кг.

Для получения результата сил сопротивления перемещению призмы волочения нам необходимо знать объем призмы волочения, который зависит от формы отвала. Для этого нам необходимо помимо ширины базового отвала получить значение высоты базового отвала

$$H_{\text{о}} = 0,2 \cdot B_{\text{о}} - 0,12. \quad (11)$$

Сила сопротивления грунта резанию определяется зависимостью [11]

$$W_p = K \cdot B_{\text{о}} \cdot h, \quad (12)$$

где K – удельная сила сопротивления грунта резанию, Н/м²; h – толщина срезаемой стружки, м.

Сила сопротивления перемещению призмы волочения определяется зависимостью [11]

$$W_{np} = \frac{G_{np\text{б}} \cdot \varphi_2 \cdot \sin \alpha}{K_p}, \quad (13)$$

где $G_{np\text{б}}$ – вес призмы волочения базового отвала, Н; K_p – коэффициент разрыхления грунта; α – угол резания, град.; φ_2 – коэффициент внутреннего трения грунта, град.

Вес призмы волочения определяется как

$$G_{np\text{б}} = \rho_{\text{гр}} \cdot g \cdot V_{np\text{б}}, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{гр}}$ – плотность грунта, кг/м³; $V_{np\text{б}}$ – объем призмы волочения базового отвала, м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Объем призмы волочения определяется как [11]

$$V_{np\text{б}} = \frac{(H_{\text{о}} - 0,25 \cdot h)^2 \cdot B_{\text{о}}}{2 \cdot \tan \delta \cdot K_p}, \quad (15)$$

где h – толщина срезаемой стружки, м; δ – угол естественного откоса грунта, град.

Сила сопротивления движению грунта вверх по отвалу

$$W_{\text{го}} = \varphi_1 \cdot G_{np\text{б}} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha, \quad (16)$$

где $G_{np\text{б}}$ – сила тяжести призмы волочения, Н; φ_1 – коэффициент трения грунта по металлу; α – угол резания, град.

Разложив силу тяжести призмы волочения, получаем следующую формулу

$$W_{\text{го}} = \varphi_1 \cdot \rho_{\text{гп}} \cdot g \cdot V_{\text{пгб}} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha. \quad (17)$$

Сила сопротивления движению грунта вдоль по отвалу [11]

$$W_{\text{одо}} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \rho_{\text{гп}} \cdot g \cdot V_{\text{пгб}} \cdot \cos \alpha. \quad (18)$$

Сила сопротивления перекачиванию колес автогрейдера [6]

$$W_k = G_{\text{б}} \cdot \cos \beta \cdot ((1-a) \cdot f + a \cdot \varphi_1), \quad (19)$$

где β – угол подъема участка работы в направлении движения, град.; f – коэффициент сопротивления качению на колесах; a – коэффициент, учитывающий часть силы тяжести, воспринимаемой отвалом.

При расчете эксплуатационного веса автогрейдера следует учитывать, что

$$G_{\text{б}} = G_{\text{отв}} + G_{\text{м}}, \quad (20)$$

где $G_{\text{отв}}$ – вес отвала, Н; $G_{\text{м}}$ – вес базовой машины, Н.

Для повышения эффективности автогрейдера необходимо понимать, есть ли наличие запаса по силе тяги, которое определяется по формуле

$$\Delta T = T_{\text{мин}} - \sum W, \quad (21)$$

где ΔT – запас по силе тяги, Н; $T_{\text{мин}}$ – минимальное тяговое усилие, выбираемое между силой тяги по сцеплению и силой тяги по мощности двигателя, Н.

Наличие запаса тягового усилия позволяет изменить конструкцию рабочего оборудования автогрейдера и, тем самым, повысить его эффективность. Связь между такими параметрами, как ширина, высота отвала и силами сопротивления связаны как прямыми, так и косвенными зависимостями. Для упрощения инженерного расчета введем коэффициенты пропорциональности, связывающие ширину отвала с его высотой и площадь лобовой поверхности с массой отвала.

Коэффициент пропорциональности высоты к ширине отвала можно определить зависимостью

$$K_{\Pi} = \frac{H_{\text{б}}}{B_{\text{б}}}. \quad (22)$$

Изменение массы рабочего оборудования учитывается коэффициентом металлоемкости

$$K_{\text{ме}} = \frac{m_{\text{роб}}}{S_{\text{б}}}, \quad (23)$$

где $S_{\text{б}}$ – площадь базового отвала, м².

Чтобы получить высоту модернизированного отвала, необходимо коэффициент пропорциональности умножить на ширину модернизированного отвала

$$H_{\text{м}} = K_{\Pi} \cdot B_{\text{м}}, \quad (24)$$

где $H_{\text{м}}$ – высота модернизированного отвала, м; $B_{\text{м}}$ – ширина модернизированного отвала, м.

Определяем площадь модернизированного отвала

$$S_{\text{м}} = H_{\text{м}} \cdot B_{\text{м}} = K_{\Pi} \cdot B_{\text{м}}^2, \quad (25)$$

где $S_{\text{м}}$ – площадь модернизированного отвала, м².

Тогда получаем, что масса отвального оборудования после модернизации будет рассчитываться по формуле

$$m_{\text{отвм}} = K_{\text{ме}} \cdot S_{\text{м}}, \quad (26)$$

где $m_{\text{отвм}}$ – масса модернизированного отвала, кг.

Этот способ позволяет приближенно учесть изменение массы отвала автогрейдера, для более точного расчета необходимо создавать 3D-модель отвала.

В соответствии с этим объем призмы волочения так же изменится

$$V_{\text{пгм}} = \frac{(K_{\Pi} \cdot B_{\text{м}} - 0,25 \cdot h)^2 \cdot B_{\text{м}}}{2 \cdot \text{tg} \delta \cdot K_p}, \quad (27)$$

где $V_{\text{пгм}}$ – объем призмы волочения для модернизированного отвала, м³.

Масса модернизированного отвала будет выглядеть следующим образом

$$m_{\text{ром}} = K_{\text{ме}} \cdot K_{\Pi} \cdot B_{\text{м}}^2. \quad (28)$$

Сила сопротивления грунта резанию примет вид

$$W_{\text{рм}} = K \cdot B_{\text{м}} \cdot h, \quad (29)$$

где $W_{\text{рм}}$ – сила сопротивления грунта резанию после модернизации, Н.

Сила сопротивления перемещению призмы волочения после модернизации

$$W_{нрм} = \frac{(K_{II} \cdot B_m - 0,25 \cdot h)^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot K_p} \cdot B_m \cdot \rho_{zp} \cdot g \cdot \varphi_2 \cdot \sin \alpha \quad (30)$$

где $W_{нрм}$ – сила сопротивления перемещению призмы волочения после модернизации, Н.

Сила сопротивления от движения грунта по отвалу будет иметь вид

$$W_{вом} = \frac{\varphi_1 \cdot \rho_{zp} \cdot g \cdot (K_{II} \cdot B_m - 0,25 \cdot h)^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot K_p} \cdot B_m \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha, \quad (31)$$

где $W_{вом}$ – сила сопротивления от движения грунта по отвалу, Н.

Сила сопротивления от движения грунта вдоль отвала будет иметь вид

$$W_{вдм} = \frac{(K_{II} \cdot B_m - 0,25 \cdot h)^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot K_p} \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \rho_{zp} \cdot g \cdot B_m \cdot \cos \alpha. \quad (32)$$

Сила сопротивления перекачиванию колес модернизированного автогрейдера

$$W_{км} = (m_m + m_{отвм}) \cdot g \cdot \cos \beta \cdot ((1-a) \cdot f + a \cdot \varphi_1), \quad (33)$$

где $m_{отвм}$ – масса модернизированного отвала, кг.

С учетом коэффициента металлоемкости получаем

$$W_{км} = (m_m + K_{ме} \cdot K_{II} \cdot B_m^2) \cdot g \cdot \cos \beta \cdot ((1-a) \cdot f + a \cdot \varphi_1). \quad (34)$$

Получив все обновленные уравнения, можно записать новую зависимость суммарной силы сопротивления рабочему процессу автогрейдера

$$\sum W_m = K \cdot B_m \cdot h + (m_m + K_{ме} \cdot K_{II} \cdot B_m^2) \cdot g \cdot \cos \beta \cdot ((1-a) \cdot f + a \cdot \varphi_1) + \frac{(K_{II} \cdot B_m - 0,25 \cdot h)^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot K_p} \cdot B_m \cdot \rho_{zp} \cdot g \cdot [\sin \alpha \cdot (\varphi_2 + \varphi_1 \cdot K_p \cdot \cos^2 \alpha) + K_p \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \cos \alpha]. \quad (35)$$

Полученная целевая функция (36) позволяет осуществить оптимизацию геометрических параметров отвала автогрейдера.

$$\Delta T(B_m) = T_{\min} - K \cdot B_m \cdot h + (m_m + K_{ме} \cdot K_{II} \cdot B_m^2) \cdot g \cdot \cos \beta \cdot ((1-a) \cdot f + a \cdot \varphi_1) + \frac{(K_{II} \cdot B_m - 0,25 \cdot h)^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot K_p} \cdot B_m \cdot \rho_{zp} \cdot g \cdot [\sin \alpha \cdot (\varphi_2 + \varphi_1 \cdot K_p \cdot \cos^2 \alpha) + K_p \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \cos \alpha] \rightarrow 0. \quad (36)$$

Автором предлагается осуществить оптимизацию методом опорных приближений с градиентом для поиска локального экстремума. Суть данного метода заключается в поиске значения переменных от начального заданного, обеспечивая постоянное улучшение результата с текущего места. [12]

4. Инженерная методика оптимизации

Как отмечалось ранее, целевая функция (1) минимизирует запас тягового усилия ΔT через варьирование ширины отвала B . Для исключения локальных экстремумов предлагается использовать двухэтапный алгоритм, включающий в себя на первом этапе однофакторный анализ:

- 1) сеточный поиск с шагом 0,1 м;
- 2) определение рабочего диапазона для ширины отвала.

На втором этапе используется модифицированный алгоритм метод опорных приближений с градиентом, причем:

- 1) градиент рассчитывается только по параметру B ;
- 2) критерий останова $|\Delta T_{i+1} - \Delta T_i| < 0,1$ кН.

Возможность проведения оптимизации позволяет сформировать алгоритм инженерной методики оптимизации, блок-схема которого представлена на рис. 1.

Данная блок-схема в дальнейшем позволит сформировать техническое задание и под него создать специализированную программу для автоматизации подбора параметров, что упростит и ускорит работу инженеров-проектировщиков. Пошаговое описание алгоритма представлено ниже.

1. *Определение условий рабочего процесса.* На первом этапе необходимо произвести сбор информации о месте проведения работ, фиксации основных параметров, которые будут необходимы для проведения ра-

бот. В этот список входят значения таких параметров, как удельная сила сопротивления грунта резанию, толщина срезаемой стружки, количество проходов по одному месту, плотность грунта, угол резания, коэффициент трения грунта по металлу, коэффициент угла внутреннего трения, коэффициент потери грунта при транспортировании, коэффициент сопротивления движению автогрейдера, длина обрабатываемого участка, коэффициент использования автогрейдера в течение рабочего дня. Это основные данные, необходимые для проведения расчета и подбора

специальной техники для выполнения поставленных задач.

2. *Параметры базового рабочего оборудования.* Это основная необходимая информация, которая позволит нам определить тип машины для выполнения заданных условий работ, позволит понять подходит ли данная модель специальной техники под наши условия рабочего процесса. Включает в себя следующие обязательные параметры рабочей машины и рабочего оборудования, необходимых для расчета: эксплуатационный вес автогрейдера, масса базовой машины, масса

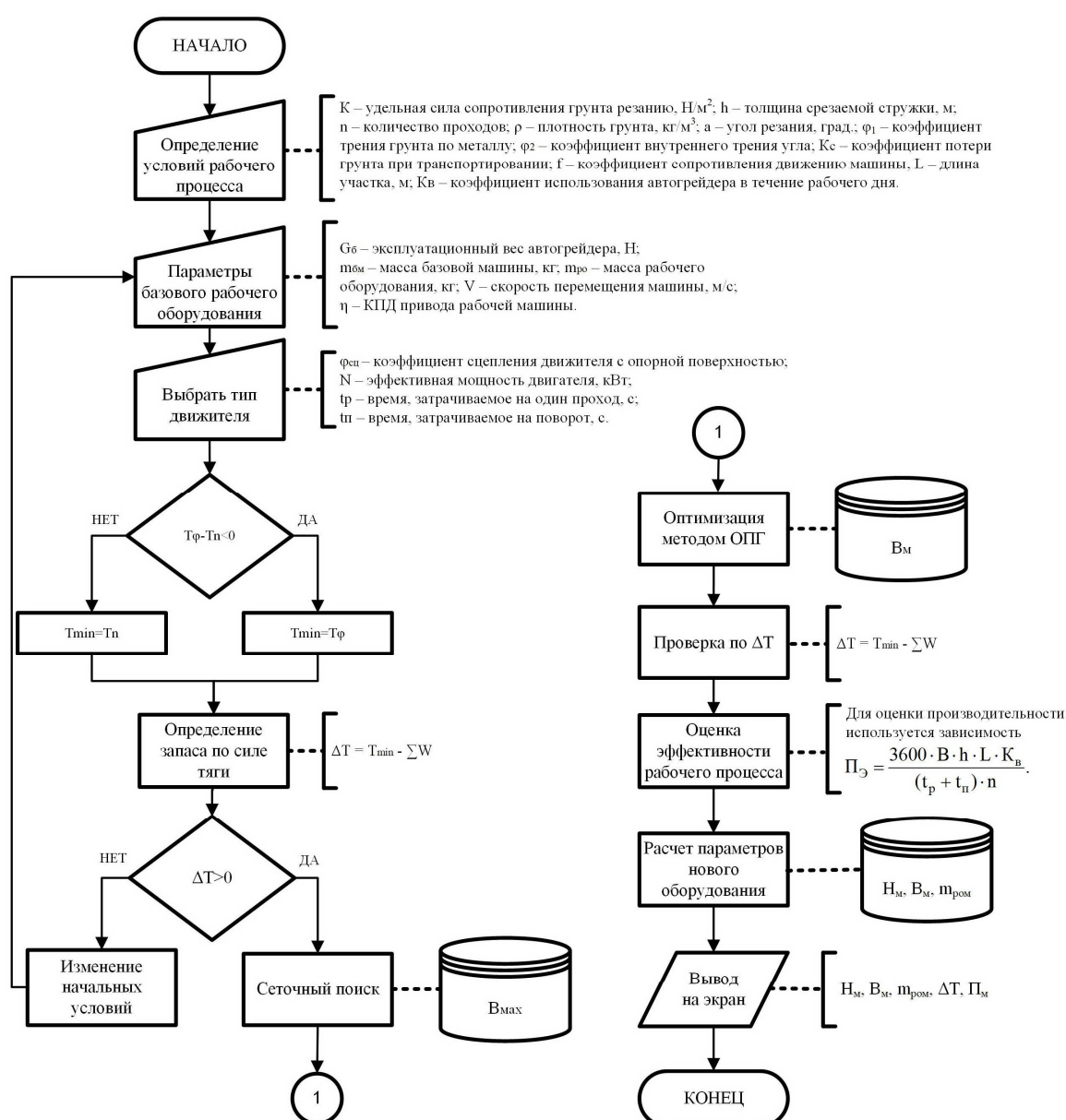


Рис. 1. Блок-схема инженерной методики оптимизации рабочего оборудования автогрейдера

рабочего оборудования, высота и ширина

рабочего оборудования, скорость перемещения автогрейдера, КПД привода рабочей машины. Определив все параметры рабочей машины, можно переходить к выбору типа движителя.

3. *Выбор типа движителя.* Данный этап позволяет осуществить получение значений таких параметров, как коэффициент сцепления движителя с опорной поверхностью, эффективная мощность двигателя автогрейдера. Эти результаты дают понимание, как получить тяговые усилия по сцеплению и двигателю из которых в дальнейшем определяется минимальное тяговое усилие. Путем выбора наименьшего значения из двух полученных в дальнейшем минимальное тяговое усилие позволит понять, имеется ли запас по силе тяги при заданных условиях работы и выбранной технике. Для этого при получении значения суммарной сил сопротивления производится вычитание последнего из минимального тягового усилия.

4. *Определение запаса по силе тяги.* Для получения запаса по силе тяги будет необходимо из значения минимального тягового усилия вычесть суммарную силу сопротивления автогрейдеру. Получение значения выше нуля дает возможность провести модернизацию рабочего оборудования и, как следствие, повысить эффективность выполнения работ на заданном участке. При модернизации рабочего оборудования все направлено на получение запаса по силе тяги приближенного к нулевому значению. Тогда результат можно будет считать максимально эффективным.

5. *Проверка условия и оптимизация.* Если запас по силе тяги меньше нуля, необходимо произвести изменение начальных условий рабочего процесса либо подобрать другую базовую машину. Если запас по силе тяги больше нуля, то осуществляется сеточный поиск рабочего диапазона для ширины отвала и затем оптимизация методом ОПГ.

6. *Проверка запаса по силе тяги.* Этот этап связан с повторной проверкой запаса по силе тяги, но уже после модернизации отвала автогрейдера. Если рассматривать реальные условия рабочего процесса, то грунт является неоднородным материалом, что гово-

рит о необходимости существования некоторого запаса по силе тяги. Предложенный алгоритм оптимизации предусматривает поиск такого значения ширины отвала автогрейдера, при котором останется заранее определенный запас силы тяги. Оптимизацию возможно выполнить при помощи функции «поиск решения» в Excel.

7. *Оценка эффективности рабочего процесса.* Для сравнения эффективности базового отвала и модернизированного проводится расчет уравнений и сравнение часовой эксплуатационной производительности. Благодаря данному сравнению можно спрогнозировать, насколько модернизированный отвал позволяет сократить сроки проведения работ, трудозатраты, ресурсы на выполнение поставленной задачи.

8. *Расчет параметров нового оборудования.* Записываются новые значения ширины, высоты и массы модернизированного отвала в базу данных.

9. *Вывод на экран.* Полученные значения выводятся на экран для использования в дальнейшей разработке.

5. Результаты оптимизации

В качестве подтверждения работоспособности предлагаемой инженерной методики, проведен подбор оптимального значения ширины отвала для автогрейдера ДЗ-122, основные параметры которого:

- 1) ширина базового отвала $B_б = 3,4$ м;
- 2) высота базового отвала $H_б = 0,95$ м;
- 3) масса базового отвала $m_б = 1410$ кг;

Рассматривались планировочные работы с толщиной стружки 0,15 м на грунтах 3 категории. В данных условиях запас по силе тяги составляет 6,55 кН, что говорит о возможности увеличения размеров отвала.

В результате оптимизации получены следующие параметры рабочего оборудования автогрейдера ДЗ-122:

- 1) ширина модернизированного отвала $B_м = 3,56$ м;
- 2) высота модернизированного отвала $H_м = 1,0$ м;

3) масса модернизированного отвала $m_m = 1575,8$ кг.

Прирост часовой эксплуатационной производительности автогрейдера на планировочных работах возрастает на $38,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, что говорит о целесообразности использования предлагаемой инженерной методики.

5. Заключение

Разработанная инженерная методика позволяет определить оптимальные параметры

отвала автогрейдера, которые, с учетом параметров базовой машины, грунтовых и технологических условий, позволят обеспечить максимальную эффективность планировочных работ.

Приведенная в статье блок-схема алгоритма позволяет разработать программный продукт для более удобного использования инженерной методики при проектировании рабочего оборудования автогрейдеров.

Список литературы

1. Воробьев А.П., Трофимов С.В. Оптимизация конструкции ковша экскаватора с использованием методов топологической оптимизации // Известия вузов. Машиностроение. 2022. № 5. С. 24–30.
2. Кузнецов Н.В., Мясников А.С. Повышение надёжности рабочего оборудования экскаватора-погрузчика путём конструктивной модернизации // Транспорт и технологические машины. 2023. № 4. С. 17–25.
3. Соколов С.В., Комиссаров А.П. Комплексный анализ конструкции рабочего оборудования фронтального погрузчика с использованием САЕ-систем // Вестник УГАТУ. 2021. Т. 25. № 3. С. 81–87.
4. Гордеев А.И., Бахтин В.Н. Совершенствование шарнирного механизма отвала автогрейдера методом силового анализа // Механизация строительства. 2022. № 2. С. 36–42.
5. Иванов Д.Л., Черных П.В. Исследование износостойкости отвальных узлов землеройных машин и пути их конструктивной оптимизации // Строительная техника и технологии. 2021. № 6. С. 44–50.
6. Lee D., Kim H., Park S. Structural optimization of excavator arms using evolutionary algorithms and finite element methods // Journal of Mechanical Science and Technology. 2023. Vol. 37. No. 1. Pp. 151–160. DOI: 10.1007/s12206-023-1245-3.
7. Белецкий Б.Ф., Булгакова И.Г. Строительные машины и оборудование. Ростов н/Д: Феникс, 2005. 608 с.
8. Пузырёв Г.И. Тяговые характеристики и динамика машин. М.: Машгиз, 1991. 256 с.

References

1. Vorobev A.P., Trofimov S.V. Optimizatsiya konstruktsii kovsha ekskavatora s ispol'zovaniem metodov topologicheskoy optimizatsii. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2022. No. 5. pp. 24–30. (In Russian)
2. Kuznetsov N.V., Myasnikov A.S. Povyshenie nadyozhnosti rabochego oborudovaniya ekskavatora-pogruzchika putyom konstruktivnoy modernizatsii. *Transport i tekhnologicheskie mashiny*. 2023. No. 4. pp. 17–25. (In Russian)
3. Sokolov S.V., Komissarov A.P. Kompleksnyy analiz konstruktsii rabochego oborudovaniya frontalnogo pogruzchika s ispol'zovaniem SAE-sistem. *Vestnik UGATU*. 2021. Vol. 25. No. 3. pp. 81–87. (In Russian)
4. Gordeev A.I., Bakhtin V.N. Sovershenstvovanie sharnirnogo mekhanizma otvala avtogreydera metodom silovogo analiza. *Mekhanizatsiya stroitelstva*. 2022. No. 2. pp. 36–42. (In Russian)
5. Ivanov D.L., Chernykh P.V. Issledovanie iznosostoykosti otvalnykh uzlov zemleroynykh mashin i puti ikh konstruktivnoy optimizatsii. *Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii*. 2021. No. 6. pp. 44–50. (In Russian)
6. Lee D., Kim H., Park S. Structural optimization of excavator arms using evolutionary algorithms and finite element methods. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2023. Vol. 37. No. 1. pp. 151–160. DOI: 10.1007/s12206-023-1245-3.
7. Beletsky B.F., Bulgakova I.G. *Stroitelnye mashiny i oborudovanie* [Construction machines and equipment]. Rostov on Don, Feniks, 2005. 608 p. (In Russian)

9. Теплухин А.П. Основы проектирования строительных машин. М.: Высшая школа, 2002. 372 с.
10. Бузин Ю.М. Системный подход – основа анализа и синтеза рабочего процесса землеройно-транспортной машины // Строительные и дорожные машины. 2002. № 10. С. 36–41.
11. Козырев С.В. Дорожные машины: теория, расчет и проектирование. М.: Машиностроение, 2006. 320 с.
12. Петров А.А., Смирнов И.В. Оптимизация параметров автогрейдеров методом математического моделирования // Известия вузов. Машиностроение. 2021. № 5. 15 с.
13. Никифоров Г.А. Тяговый расчет и динамика землеройных машин. М.: Транспорт, 1983. 276 с.
14. Сафронов А.В. Проектирование и эксплуатация дорожных машин. СПб.: Политехника, 2010. 328 с.
15. Иванов В.П. Методика расчета тяговых характеристик автогрейдеров // Вестник машиностроения. 2018. № 3. 12 с.
8. Puzyrev G.I. *Tyagovye kharakteristiki i dinamika mashin* [Tractive characteristics and dynamics of machines]. Moscow: Mashgiz, 1991. 256 p. (In Russian)
9. Teplukhin A.P. *Osnovy proektirovaniya stroitelnykh mashin* [Fundamentals of construction machinery design]. Moscow, Vysshaya shkola, 2002. 372 p. (In Russian)
10. Buzin Yu.M. *Sistemnyy podkhod – osnova analiza i sinteza rabochego protsessa zemleroyno-transportnoy mashiny. Stroitelnye i dorozhnye mashiny*. 2002. No. 10. pp. 36–41. (In Russian)
11. Kozyrev S.V. *Dorozhnye mashiny: teoriya, raschet i proektirovanie* [Road machines: theory, calculation and design]. Moscow: Mashinostroenie, 2006. 320 p. (In Russian)
12. Petrov A.A., Smirnov I.V. *Optimizatsiya parametrov avtogreyderov metodom matematicheskogo modelirovaniya. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2021. No. 5. 15 p. (In Russian)
13. Nikiforov G.A. *Tyagovyy raschet i dinamika zemleroynykh mashin* [Tractive calculation and dynamics of earthmoving machines]. Moscow, Transport, 1983. 276 p. (In Russian)
14. Safronov A.V. *Proektirovanie i ekspluatatsiya dorozhnykh mashin* [Design and operation of road machines]. Saint Petersburg, Politekhnik, 2010. 328 p. (In Russian)
15. Ivanov V.P. *Metodika rascheta tyagovykh kharakteristik avtogreyderov. Vestnik mashinostroeniya*. 2018. No. 3. 12 p. (In Russian)