УДК 624.13.002.5

МЕТОДИКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАВЕСНОГО СМЕННОГО ГРУНТОУПЛОТНЯЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Кравченко И.Н., Саляев С.И., Марковчин С.Г., Саляев Н.И.

ФГБВОУ ВПО «Военно-технический университет», Балашиха, e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

В процессе уплотнения свойства среды постоянно изменяются, что требует изменения режимов работы навесного грунтоуплотняющего оборудования и своевременной смены его типа в зависимости от места применения. Основное правило уплотнения — это постепенное повышение контактных давлений, которые не должны превышать предела прочности грунта. При несоблюдении этого условия происходит разрушение структуры грунта, что вызывает формирование призмы волочения, неравномерную плотность по глубине и появление волнистой поверхности. Это приводит к дополнительным работам и затратам времени. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны практические рекомендации и даны технические предложения по выбору конструктивных и кинематических параметров рабочих органов навесного сменного оборудования для уплотнения грунтов обратных засыпок до требуемой плотности с учетом постоянно изменяющихся свойств среды.

Ключевые слова: навесное грунтоуплотняющее оборудование, пневмошины, вибротрамбовки, рабочие органы, эксплуатационная производительность, конструктивные элементы

THE METHOD IS EFFECTIVE ATTACHMENT OF REMOVABLE EQUIPMENT SOIL COMPACTION IN CONFINED AREAS

Kravchenko I.N., Salyaev S.I., Markovchin S.G., Salyaev N.I.

Federal State military institution of higher education «Military-Technical University», Balashikha, e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

In the process of sealing properties of the environment are constantly changing, which requires the change of operating modes of attached soil compacting equipment and timely change of its type depending on the place of application. The basic rule of the seal is the gradual increase of contact pressures, which should not exceed the tensile strength of the soil. At non-observance of this condition is the destruction of the structure of soil, which causes the formation of prism drawing, uneven density by depth and the emergence of a wavy surface. This leads to extra work and time wasting. On the basis of theoretical and experimental research and practical recommendations are given the choice of technical proposals for the design and kinematic parameters of working bodies mounted interchangeable equipment for ground ramming reverse fillings to the required density with the constantly changing properties of the medium.

Keywords: attachments sealing equipment, pneumatic tires, rammers, working bodies, operational performance, structural elements

В практике производства работ широкое применение получил метод уплотнения насыпных оснований слоями ограниченной толщины (послойное уплотнение) [2]. Поэтому необходимо правильно подобрать соотношения параметров и режимов работы навесного пневмошинного оборудования, которые зависят от физико-механических свойств грунта и его состояния, опрекоэффициентом $K_{..}$. Поставленная задача решается путем определения геометрических параметров (размеров) пневмошин с использованием разработанных моделей взаимодействия рабочих органов с различными видами грунтов [3, 4].

Предлагаемая методика включает в себя расчет основных параметров пневмошин, осуществляемый в последовательности, представленной в виде взаимосвязанных этапов

Этап 1. Тяговый расчет рабочего оборудования базовых машин.

Сопротивление качению пневмошин $W_{\rm f}$ обусловливается главным образом

деформацией грунта и по своему удельному значению является наибольшим:

$$W_f = f_1 G, \tag{1}$$

где G — максимальный вес оборудования; f_1 — максимальное значение коэффициента сопротивления качению вальцов катка при первом проходе по рыхлому грунту

$$f_1 = \frac{T}{G} = \frac{nh^2bc}{\pi D} \left(\frac{1}{3} + \frac{a}{2}\right),$$
 (2)

где T — сила тяги, кг; D — диаметр колеса, м; n — число кулачков; b, a — соответственно ширина и длина опорной поверхности кулачка, м; h — высота кулачка, м; c — коэффициент деформации грунта, кгс/см² (c = 0,1...1,0 — для очень рыхлого грунта; c = 0,1...1,0 — для рыхлого грунта).

Сопротивление движению на уклон определяется:

$$W_{h} = i G, (3)$$

где i — уклон в долях единицы ($i_{\text{max}} = 0,1$); G — вес катка, кг.

При работе катка общее сопротивление движению составит:

$$\sum W = G(f+i). \tag{4}$$

При трогании на рыхлом грунте и предельном подъеме, кроме перечисленных сопротивлений, будет возникать сопротивление W_i преодолению сил инерции

$$W_{j} = \frac{x}{g}G\frac{dv}{dt},\tag{5}$$

где x — коэффициент учета вращающихся масс; υ — скорость движения, км/ч; t — время, c; g — ускорение силы тяжести, м/ c^2 .

Полагая, что оборудование движется равноускоренно, получим:

$$W_{j} = \frac{xv}{g}G_{-t}, \tag{6}$$

где t — время разгона, принимаемое равным t = 2-3 с.

С учетом преодоления сил инерции общее сопротивление движению:

$$\sum W'' = W_f + W_h + W_j. (7)$$

Для навесного оборудования необходимо располагать тяговой характеристикой рукояти экскаватора, управляемой гидроцилиндром. По ней необходимо определить силу тяги, соответствующую максимальной тяговой мощности:

$$T_{N_m} \cong \sum W$$
.

С учетом сил инерции оборудования необходимо соблюдение условия

$$T_{\text{mmax}} \geq W''$$
.

Эксплуатационная производительность определяется:

$$\Pi_{9} = \frac{L(B-A)H_{p}K_{B}}{\left(\frac{L}{v} + tn\right)}, \tag{8}$$

где L — длина уплотняемого участка, м; B — ширина укатываемой полосы, м; A — величина перекрытия, принимаемая равной A = 0,2 м; υ — рабочая скорость катка, м/ч; $H_{\rm p}$ — толщина слоя грунта в плотном теле (материале), м; t = 0,02 ч — время, затрачиваемое на разворот экскаватора в конце участка; n — необходимое число проходов катка; $K_{\rm B}$ = 0,80-0,85 — коэффициент использования рабочего времени.

Этап 2. Расчет навесного грунтоуплотнительного оборудования.

Проектирование навесного пневмоколесного оборудования на базе типовых пневмошин с расчетом элементов гидропривода производим согласно разработанной методике [5], используя схему взаимодействия грунта с пневмошиной и исходные данные табл. 1 (размеры колеса Φ -10A, диаметр D_k и ширина обода B).

Таблица 1 Основные параметры пневмошинного оборудования

Параметры	Модель шины	
	Ф-10А	Ф-55
Обозначение шины (по размеру в мм)	370-506	320-508
Наружный диаметр, мм	1220	1110
Ширина профиля, мм (по центру сечения)	340	270
Максимальная нагрузка, Н	43000	23000
Давление воздуха в шине, соответствующее максимальной нагрузке, МПа	0,4-0,8	0,3 - 0,8
Максимальная скорость, км/ч	20	20
Масса, кг	150	90

Допускаемая нагрузка $R_{\rm max}$ на колесо определяется по формуле [1]:

$$R_{\text{max}} = 2aB[q_{\text{cp}}], \tag{9}$$

Приняв деформацию пневмошины $\delta = \lambda D_{\nu}$, где [λ] = 0,025, получим:

$$a\lambda = \sqrt{\lambda}(1-D)_k = 0.025^{0.5}(1-0.025)$$
 1220 = 187,9 mm.

Распределение удельной нагрузки на шину будет происходить по эллиптической кривой. Из равенства площадей прямоугольника

 $F_{_{\rm II}} = 2aq_{_{
m cp}}$ и полуэллипса $F_{_{\rm 3}} = 0,5\pi aq_{_{
m max}}$

$$q_{\rm cp} = \frac{\pi}{4} [q_{\rm max}] = \frac{3,14}{4} \cdot 1,5 = 1,18 \text{ M}\Pi a.$$

Определим ширину обода колеса $B=0,3\cdot 1220=366$ мм. После подстановки полученных значений a и B в формулу (9), получим: $R_{\max}=2\cdot 18,79\cdot 3,66\cdot 1,18=1615$ кг. Приняв с допущением $D_1=D_k$ из теории

Приняв с допущением $D_1 = D_k$ из теории контактных напряжений, определим параметры a и b:

$$a = b = 0.034\sqrt[3]{D_k}R_{\text{max}} = 0.034 \cdot 10.5 \cdot 1615 = 469.5$$
 MM.

При этом возникающее давление на поверхности пятна контакта определяется по следующей зависимости:

$$q_{\text{max}} = \frac{1,5R_{\text{max}}}{\pi ab} = \frac{1,5 \cdot 1615}{3,14 \cdot 46,95^2} = 0,35 \text{ M}\Pi a.$$

Решая совместно вышеприведенные уравнения, получим $q_{\max} \leq [q_{\max}]$. Значение давления $[q_{\max}]$ находится в пределах от 1,56 до 2,8 МПа и зависит от качества резинотехнических изделий.

Проведенные расчеты показали допустимость применения выбранной пневматической шины, хотя допускается перегрузка колес до 70% и выше. Однако перегрузка колес транспортных машин на 20–80% против нормы приводит к снижению пробега соответственно на 30–70%. При уплотнении грунтов обратных засыпок применяются пневмошины низкого давления. В области контакта одновременно деформируются колесо и поверхность покрытия. Тогда площадь пятна контакта составит:

$$F = (4,0...4,8) \cdot (\lambda_0 - 0,03) \cdot B^2 =$$

= 4,0 \cdot 0,297 \cdot 36,6² = 1591,3 cm²,

где B = 0,2-0,3 – коэффициент усадки шины, показывающий, что чем больше усадка шины, тем лучше амортизируют колеса, меньше деформация грунта и удельное давление на него.

Динамическая нагрузка на колесо в шинах низкого давления на 15% больше статической и в 2,5 раза меньше, чем в шинах высокого давления. Нагрузка на колесо с пневматическими шинами низкого давления определяется по зависимости [4]:

$$R_{\text{max}} = q \cdot F = i \cdot p \cdot F = 1,2 \cdot 4 \cdot 1591,3 \cdot 9,8 = 7638,2 \text{ kg} = 74854,4 \text{ H}.$$

Деформацию шины находим из выражения:

$$\delta = \lambda \cdot D_{\nu} = 0.04 \cdot 122 = 4.88 \text{ cm}.$$

Тогда сопротивление укатыванию будет:

$$W_k = c_1 R_{\text{max}} \sqrt[3]{\frac{R_{\text{max}}}{pr^2}} = 0,05 \cdot 7638, 2 \cdot 0, 27 \cdot 9, 8 = 1009, 4 \text{ H.}$$

При укатывании грунта выгодно иметь большее давление p. При качении колеса по мягкому грунту сопротивление укатыванию W_k зависит от объемной деформации, определяемой коэффициентом q_{\circ} [1]. При этом коэффициент объемной деформации q_{\circ} устанавливается в зависимости от типа

грунтов (грунты обратных засыпок и укатанные грунты). Таким образом, сопротивление укатыванию будет зависеть от нагрузки, деформации и жесткости пневмошины.

Общее сопротивление укатыванию W_{Σ} при установившемся движении можно определить, используя зависимость вида:

$$W_{\Sigma} = \phi z W_k + W_k = (2 \cdot 3 \cdot 103 + 103) \cdot 98 = 721 \text{ Kr} = 7065,8 \text{ H}.$$

Этап 3. Расчет гидрооборудования базовой машины.

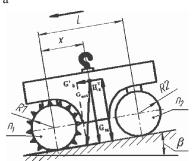
Определение энергозатрат процесса уплотнения, численное значение которых выражено зависимостью:

$$A_{\Sigma} = gW_k Ln = 9,8.618.0,4.3 = 7300$$
 Дж.

где W_k — сопротивление укатыванию процесса уплотнения грунта одной пневмошиной; L — длина пути колеса; n — количество колес.

Механизм поворота колеса (рис. 1) состоит из рукояти гидроцилиндра, коромысла и ведомого звена – колеса.

и_кLn — 9,6.016.0,4.3 — 7300 дж. a



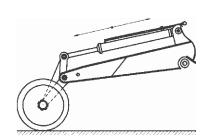


Рис. 1. Схемы грунтоуплотнительных устройств: а – навешиваемых на кови; б – пневмошинного, смонтированного на рукояти экскаватора

Не располагая исчерпывающими результатами исследований оптимальных отношений кинематических звеньев механизма, для расчета назначим их по подобию с существующими экскаваторными конструкциями: длина коромысла – 1200 мм; длина большего плеча коромысла – 900 мм, длина малого плеча коромысла – 300 мм.

Расчетным режимом для выбора гидроцилиндра привода колес следует считать уплотнение грунта при имеющихся длинах стрелы и рукояти на экскаваторе марки ЭО-4225, при котором предполагается наибольшее его нагружение. В этом режиме активной силой на штоке гидроцилиндра преодолеваются сопротивление грунта уплотнению, а также внутренние сопротивления в шарнирах механизма.

Сопротивление грунта уплотнению зависит от формы исходной поверхности

обратной засыпки, которая может быть плоской, выгнутой и с уклоном. В первом приближении предположим эту поверхность плоской. При этом за одну операцию уплотнения грунта поворотом колеса относительно шарнира его колесо переместится и повернется на угол β = 300, который определяет ход поршня гидроцилиндра. При этом максимальная толщина уплотнения составляет h = 100 мм.

Тогда рабочий объем для гидроцилиндра рукояти можно определить по фор-

$$W_{\text{гц}} = \frac{A_{\Sigma}}{P_{p,cp} \cdot \eta_k \cdot K_n} = \frac{73}{22,5 \cdot 0,72 \cdot 0,76} = 6 \text{ л.}$$

Произведём выбор гидроцилиндра по его основным параметрам, используя данные табл. 2.

Таблица 2 Параметры гидроцилиндров при номинальном давлении 25 МПа

Наименование	Значения параметров		
Диаметр поршня D , мм	100	110	125
Диаметр штока <i>d</i> , мм	63	70	80
Наружный диаметр гильзы D_1 , мм	127	140	152
Наружный радиус концевой проушины r , мм	80	80	90
Размер $A = L_o - L_n$, mm	470	490	500
Площадь поршня F , см ²	78,5	95	122,7
Рабочий объем $W_{_{\mathrm{ru}}}$, л:			
при ходе поршня $L_{_n} = 560$	_	_	6,7
при ходе поршня $L_{\scriptscriptstyle n} = 710$	_	6,75	_
при ходе поршня $L_{_n} = 900$	7,07	_	_

Выбранный по рабочему объему гидроцилиндр (D = 125 мм) привода поворота пневмоколес следует проверить на возможность преодоления максимального сопротивления грунта уплотнению, которое по аналогии с вычислением работы $A_{\scriptscriptstyle \Sigma}$ определим как

$$W_{\text{max}} = (1,025...1,035) \cdot W_{\Sigma} = 1,03 \cdot 7,1 = 7,3 \text{ KH}.$$

Усилие на штоке должно быть достаточным для преодоления максимального сопротивления уплотнению грунта. Максимально рабочее давление $P_{p\max}$ в гидроцилиндре

$$P_{p\text{max}} = \frac{4P_{k\text{max}}}{1000 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot i_{\text{min}} \cdot \eta_k} = \frac{4 \cdot 7.3}{1000 \cdot 3.14 \cdot 0.125^2 \cdot 0.15 \cdot 0.84} = 4.7 \text{ M}\Pi \text{a}.$$

Гидроцилиндр удовлетворяет условиям проверки, если выполняется условие

$$P_{\text{nmax}} \leq 0.9 P_{\text{mmax}}$$

 $P_{p\max} \leq 0.9 P_{\max},$ где P_{\max} — максимальное давление, развиваемое насосом, МПа.

Как и ранее, здесь коэффициентом 0,9 учтены потери давления в гидролиниях.

Максимальное усилие P_{\max} , кН, на штоке гидроцилиндра (без внутренних потерь) составит:

$$P_{\text{max}} = 1000 \cdot P_{\text{pmax}} \frac{\pi D^2}{4} = 1000 \cdot 39,79 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,125^2}{4} = 89,5 \text{ kH},$$

где $P_{p\max}$ — максимальное рабочее давление жидкости в гидроцилиндре, равное давлению настройки клапана вторичной защиты, МПа; D — диаметр гидроцилиндра, м.

Проверяем преодоление максимального сопротивления $W_{\rm max}$ усилием на гидроцилиндре колеса: 89,5 кH \geq 7,3 кH.

После выполненной проверки принимаем гидроцилиндр управления поворотом пневмоколес с рабочим объемом, равным $W=6.7~\mathrm{n}$

 $W_{\rm ru} = 6,7$ л. Механизм поворота пневмошинных колес должен обеспечить угол поворота до 60° , при котором достигается необходимая для уплотнения грунтов траектория колес и исключается их опрокидывание в различных положениях стрелы и рукояти.

Для получения оптимального угла поворота колес используем механизм с качающимся гидроцилиндром [1], управляющим

$$N_{_{\mathrm{JB}}} = \frac{A \cdot q}{K_{_{\mathrm{H}}} \cdot t_{_{\mathrm{max}}} \cdot \eta_{_{n}} \cdot \eta_{_{\mathrm{po}}}} = \frac{7.3}{0.85 \cdot 6.2 \cdot 0.53} = 2.6 \text{ }_{\mathrm{KBT}},$$

где $K_{_{\rm H}}-$ коэффициент использования мощности насосной установки в процессе уплотнения; A- энергоемкость процесса уплотнения в расчетном грунте, отнесенная к единице прохода пневмошины, кДж/м; $\eta_{_{N}}\eta_{_{{\rm po}}}-$ суммарный КПД привода и рабочего оборудования.

$$\Pi_{_{9}} = \frac{(B_{_{y}} - b)x_{_{\text{cp}}} \cdot H \cdot K_{_{\text{B}}}}{n} = \frac{1,1 \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 0,7}{6} = 20 \text{ m}^{3}/\text{q},$$

где B_y — ширина уплотняемой полосы, м; b— ширина перекрытия смежных полос, м (b=0); $x_{\rm cp}$ — средняя рабочая скорость экскаватора при уплотнении грунта, км/ч; ${\rm H}$ — толщина уплотняемого слоя грунта, м ${\rm (H}=0,10-0,15~{\rm m})$; $K_{\rm B}$ — коэффициент использования внутрисменного времени; n— необходимое число проходов катка по одному следу (n=4-6).

На основе расчетов по данным рекомендациям сформированы технические предложения навесного сменного грунтоуплотняющего оборудования [3], конструктивные элементы которого, как результат инвариантного проектирования с применением САПР КОМПАС-3D, представлены на рис. 2 и 3.

Выводы

1. Производительность разработанных навесных грунтоуплотняющих средств

возвратно-поступательным движением коромысла с пневмоколесами уплотнения грунта. При этом будем считать заданными: радиус шарнира коромысла, расстояние на рукояти между шарнирами коромысла, отношение угла его поворота к углу поворота кривошипа $\gamma/\alpha=1,5$.

Далее определяем угол поворота кривошипа: $\alpha = 60/1,5 = 40^{\circ}$.

Максимальную продолжительность технологической операции уплотнения t_{\max} определяем по эмпирической зависимости:

$$t_{\text{max}} = 3 + 4l = 3 + 4 \cdot 0, 8 = 6, 2 \text{ c.}$$

где l — длина прохода пневмошины, принимаемая равной l = 0,8 м.

Тогда расчетную мощность первичного двигателя $N_{_{\rm дв}}$, необходимую для осуществления процесса уплотнения, определяем по формуле:

Этап 4. Расчет производительности уплотнения грунта.

Часовая эксплуатационная производительность уплотнения грунта навесным оборудованием на пневматических шинах определяется по формуле:

в стесненных условиях должна быть не ниже производительности отряда землеройно-транспортных машин. При этом пробный слой (толщина слоя не должна превышать 20...30 см) необходимо уплотнять последовательными проходами и после каждого отбирать пробы, на основании которых определяется требуемая плотность грунта.

2. На основании полученного эффекта, сформулированы практические рекомендации и технические предложения по уплотнению грунтов обратных засыпок в стесненных условиях навесным сменным грунтоуплотняющим оборудованием гидравлических экскаваторов или погрузчиков на базе спаренных шипованных и нешипованных пневматических шин (основная длина полосы уплотнения) и вибротрамбовками (на концевых участках полосы уплотнения).

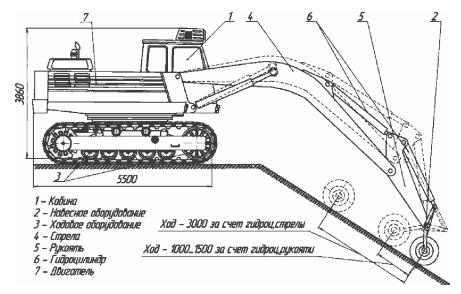


Рис. 2. Уплотнение грунта гладкой поверхностью навесными пневмошинами

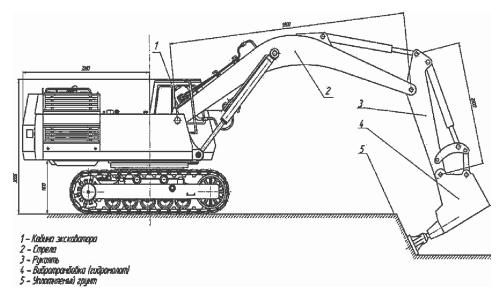


Рис. 3. Уплотнение грунтов обратных засыпок навесными вибротрамбовками

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Кравченко И.Н. Повышение эффективности навесного сменного оборудования для уплотнения грунтов в стесненных условиях: монография / И.Н. Кравченко, С.Г. Марковчин, В.В. Мирзоев, С.И. Саляев. М.: Изд-во «Эко-Пресс», 2012.-210 с.
- 2. Кравченко И.Н. Применение навесного оборудования для уплотнения грунтов и искусственных насыпей транспортных магистралей / И.Н. Кравченко, В.В. Мирзоев, С.Г. Марковчин, С.И. Саляев // Механизация строительства. N2 8. 2012. С. 2-10.
- 3. Кравченко И.Н. Разработка навесного сменного оборудования для уплотнения грунтов обратных засыпок
- 4. Кравченко И.Н. Физико-математическая модель уплотнения грунтов навесным пневмошинным оборудованием / И.Н. Кравченко, С.И. Саляев, Н.И. Саляев // Materiały VIII międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami». Przemyśl: Nauką i studia, 2012.
- 5. Саляев С.И. Методика расчета параметров и определения рациональных режимов работы адаптивной системы «вибротрамбовка-грунт» / С.И. Саляев, И.Н. Кравченко, Н.И. Саляев, С.Г. Марковчин // Механизация строительства. № 11. 2012. С. 18–25.