

sciences, the associate professor "Hoisting-and-transport, traction cars and a hydraulic actuator", the Siberian state automobile and highway academy "SibADI" (644080, Omsk, Mira St., 5, e-mail: remizovich_uv@sibadi.org).

Abdulaeva Olga Vladimirovna (Russian

Federation, Omsk) – candidate of technical sciences, the teacher "Hoisting-and-transport, traction cars and hydraulic actuator", the Siberian state automobile and highway academy "SibADI" (644080, Omsk, Mira St., 5, e-mail: abdulaeva_ov@mail.ru).

.....

УДК.629.084

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

*С. В. Савельев, И. К. Потеряев, Г. Г. Бурый, А. С. Белодед
ФГБОУ ВО «СИБАДИ», Россия, г. Омск*

Аннотация. В данной статье исследованы частоты колебаний вибровозбудителя при уплотнении грунтовых насыпей, рекомендованные для вибрационных катков ОАО «Раскат». Представлена методика обоснования режимных параметров вибрационных катков для уплотнения грунтов. Предложена программа, позволяющая автоматизировать процесс выбора режимов работы для конкретной модели вибрационного катка при уплотнении различных типов грунтов. Проведенные исследования позволят повысить производительность и эффективность использования вибрационных катков для уплотнения грунтов.

Ключевые слова: уплотнение, вибрационный каток, грунт, режимные параметры, виброускорения.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривая вопрос обоснования параметров дорожных катков необходимо отметить, что правильный их выбор напрямую влияет на эффективность процесса уплотнения дорожно-строительных материалов. При этом в зависимости от различных свойств уплотняемого материала необходимо использовать либо различные конструкции катков, что существенно удорожает строительство автодороги, либо правильно подбирать режимы работы катка, что так же вызывает дополнительные сложности. Режимные параметры взаимосвязаны между собой, при их выборе необходимо учитывать изменяемые в процессе деформации свойства материала, отслеживать обратную связь от обрабатываемой среды к дорожному катку [1, 2, 3]. Для вибрационных катков этот вопрос стоит ещё более остро, поскольку необходимо увязывать параметры вибрации (частота колебаний, вынуждающая сила, амплитуда колебаний) со статическими параметрами катка

(масса, геометрические размеры), правильно выбирать скоростной режим и количество проходов катка по одному следу. Решение этой проблемы позволит интенсифицировать процесс уплотнения, повысить энергоэффективность и производительность вибрационных катков.

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ

Одним из основных параметров, влияющих на эффективность уплотнения грунтовых сред, является частота колебаний вибровозбудителя. Большинство производителей уплотняющей техники назначают её, либо на основании рекомендаций СНиПов, либо по результатам эмпирических испытаний для различных уплотняемых сред. Рассмотрим частоты колебаний вибровозбудителя при уплотнении грунтовых насыпей (таблица 1), рекомендованные для вибрационных катков ведущего производителя уплотняющей техники ОАО «Раскат».

**ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ,
РЕКОМЕНДОВАННЫЕ ДЛЯ САМОХОДНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ
(НА ПРИМЕРЕ КАТКОВ ОАО «РАСКАТ»)**

Марка катка	Эксплуатационная масса катка, кг	Тип грунта	Частота вращения вала вибровозбудителя, Гц	
1	2	3	4	
ДУ-98	11500	Связный	42	
ДУ-98	11500	Несвязный	50	
			50	
ДУ-99	10500	Связный	35	
			Несвязный	40
				50
RV-11DT	11000	Связный	30	
			Несвязный	35
				40
RV-13DT	13000	Связный	30	
			Несвязный	34
				43
RV-15DT	15000	Связный	30	
			Несвязный	30
				40
RV-7,0DD	7500	Связный	40	
			Несвязный	45
				57
RV-9,0DD	9000	Связный	35	
			Несвязный	40
				50
RV-11,0DD	11000	Связный	30	
			Несвязный	35

1. Задавая частотой колебаний вибровозбудителя можно определить вынуждающую силу вибровозбудителя

$$P = 39,4 \cdot m_d \cdot r_d \cdot f^2, \quad (1)$$

где – масса дебаланса, кг; – радиус вращения центра тяжести дебаланса, м; – частота колебаний вибровозбудителя, Гц [4].

2. Рабочая скорость дорожного катка определяется из условия соответствия времени приложения нагрузки к уплотняемой среде, обеспечивающего развитие полных пластических деформаций среды под вальцом в течение текущего прохода катка [4]. Скорость должна быть напрямую увязана с частотой колебаний и длиной дуги контакта вальца с грунтом. Длина дуги контакта характеризуется геометрическими размерами вальца, таким образом, что с учётом скорости передвижения катка, уплотняемый грунт должен испытать требуемое количество циклов виброколебаний [4].

$$v = \frac{60 \cdot d \cdot n_{\text{пр}} \cdot f}{n_{\text{ц}}}, \quad (2)$$

где d – длина дуги пятна контакта вальца с грунтом, м; $n_{\text{пр}}$ – потребное число циклов нагрузки при уплотнении (для связного грунта 20000; для несвязного – 5000); f – число проходов катка; $n_{\text{ц}}$ – частота колебаний вибровозбудителя, Гц;

$$d = 2 \cdot R \cdot \arcsin \left(2 \sqrt{\frac{k_{\text{пр}} \cdot (P + 9,81 \cdot m_2)}{B \cdot R \cdot E}} \right), \quad (3)$$

где m_2 – масса катка, приходящаяся на валец, кг; B – ширина вальца катка, м; E – вынуждающая сила вибровозбудителя, Н; R – радиус вальца, м; $k_{\text{пр}}$ – модуль деформации грунта, Па; α – коэффициент превышения от совместного действия вибрации и статической силы [4, 5].

Исследования Н. Я. Хархуты, С. С. Вялова, В. Т. Трофимова [4, 6, 7], позволили получить регрессионные зависимости изменения модуля деформации связного (4) и несвязного (5) грунтов от стадии процесса уплотнения (величины текущей плотности).

$$E = \left(743 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{max}}} \right)^2 - 1279 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{max}}} \right) + 560 \right) \cdot E', \quad (4)$$

$$E = \left(864 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{max}}} \right)^2 - 1498 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{max}}} \right) + 653 \right) \cdot E', \quad (5)$$

где ρ – плотность грунта, кг/м³; ρ_{max} – максимальная стандартная плотность грунта, кг/м³; E' – единичное значение модуля деформации, МПа.

$$k_{\text{пр}} = -0,018 \cdot \left(\frac{P}{m_2 \cdot a'} \right) + 5,18, \quad (6)$$

где a' – единичное значение виброускорения (=1 м/с²);

3. Основным условием протекания процесса уплотнения является условие [1]

$$\sigma_{\text{T}}(t_i) < \sigma(t_i) < \sigma_{\text{пр}}(t_i), \quad (7)$$

где σ_{T} – предел текучести уплотняемого материала, Па; σ – контактные напряжения, Па; $\sigma_{\text{пр}}$ – предел прочности уплотняемого материала, Па; t_i – i -й момент времени, с.

4. Толщина уплотняемого слоя грунта с учётом зоны активного действия вибрации для связного (8) и несвязного (9) грунта определится по результатам исследований затухания виброколебаний в грунтовой среде [8, 9, 10]:

$$h = h' \cdot \frac{\rho_{\text{к}}}{\rho} \cdot \log_{k_3} \left(\frac{50,2 \cdot \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma'} \cdot k_y \cdot a' + 13,3 \cdot k_y \cdot a' - 35,2 \cdot \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma'} \cdot a' - 9,3 \cdot a'}{\left(-0,018 \cdot \left(\frac{P}{m_2} \right)^2 + 5 \cdot \frac{P}{m_2} + 50,8 \cdot a' \right) \cdot \left(0,86 - 1,3 \cdot k_y + 1,44 \cdot \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma'} \right)} \right); \quad (8)$$

$$h = h' \cdot \frac{\rho_{\text{к}}}{\rho} \cdot \log_{k_3} \left(\frac{27,4 \cdot \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma'} \cdot k_y \cdot a' + 8,1 \cdot k_y \cdot a' - 19,5 \cdot \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma'} \cdot a' - 5,6 \cdot a'}{\left(-0,018 \cdot \left(\frac{P}{m_2} \right)^2 + 5 \cdot \frac{P}{m_2} + 50,8 \cdot a' \right) \cdot \left(3,3 - 4,1 \cdot k_y + 2,3 \cdot \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma'} \right)} \right), \quad (9)$$

где $\rho_{\text{к}}$ – конечная плотность грунта, кг/м³; k_3 – коэффициент, учитывающий понижение значений виброускорений по толщине грунта; k_y – коэффициент уплотнения; σ – напряжение на пятне контакта вальца с грунтом на конечной стадии уплотнения, МПа; $\sigma_{\text{к}}$ – единичное значение напряжения

(1 МПа); – единичное значение толщины (1 м); – вынуждающая сила вибровозбудителя, Н [10].

Коэффициент, учитывающий затухание виброускорений по толщине связанного (10) и несвязанного (11) грунта, определится по эмпирическим зависимостям:

$$k_3 = 0,073 - 0,077 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_{max}}\right) + 0,0065 \cdot \frac{\sigma_k}{\sigma'}; \quad (10)$$

$$k_3 = 0,08 - 0,086 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_{max}}\right) + 0,014 \cdot \frac{\sigma_k}{\sigma'}. \quad (11)$$

Контактные напряжения определяются по зависимости [4]

$$\sigma = k_{пр} \cdot \frac{P + 9,81 \cdot m_2}{B \cdot d}. \quad (12)$$

Предел прочности для связного (13) и несвязного (14) грунтов от стадии процесса уплотнения (величины текущей плотности), определяться по регрессионным зависимостям, выведенным из исследований Н. Я. Хархуты, С. С. Вялова, В. Т. Трофимова [4, 6, 7, 11]:

$$\sigma_k = \left(1,66 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_{max}}\right)^{8,2245}\right) \cdot \sigma'; \quad (13)$$

$$\sigma_{пр} = \left(0,8756 \cdot \left(\frac{\rho_k}{\rho_{max}}\right)^{9,6672}\right) \cdot \sigma', \quad (14)$$

где σ' – единичное значение напряжения ($\sigma' = 1$ МПа). Коэффициент детерминации составил $R^2=0,98$.

Эффективность представленного подхода к выбору параметров виброкатков и адекватность предложенной методики, подтверждены проведением экспериментальных исследований на лабораторной базе ФГБОУ ВО «СибАДИ» и в производственных условиях при реконструкции земляного полотна автодороги Р – 404 «Тюмень–Тобольск».

Основным условием эффективности процесса уплотнения при выборе режимных параметров вибрационных катков являются значения напряжений на пятне контакта вальца с грунтом. Они не должны превышать предел прочности уплотняемого грунта. Значения рациональной частоты колебаний вибровозбудителя, в нашем случае, лежали в диапазоне от 30 до 60 Гц. Комплексное условия для обоснования

рациональных режимных параметров выражается системой неравенств (15):

$$\begin{cases} a_1, f_k \rightarrow \max; \\ \sigma < \sigma_{пр}; \\ \sigma_k < \sigma_{пр2}; \\ d < R; \\ d_k < R. \end{cases} \quad (15)$$

Для облегчения процесса расчёта была составлена блок-схема алгоритма расчета режимных параметров и разработана программа, позволяющая автоматизировать процесс выбора режимов работы для конкретной модели катка при уплотнении того или иного типа грунтов. Интерфейс программы представлен на рисунке 1 [12]. В качестве программного инструмента использовался продукт Microsoft Visual Basic.

Марка катка	Hammm 3518
Начальная плотность грунта, кг/м³	1600
Требуемая плотность грунта, кг/м³	1900
Максимальная стандартная плотность грунта, кг/м	1900
Число проходов катка	8
Тип грунта	связный
<input type="button" value="Ввод"/> <input type="button" value="Расчет"/> <input type="button" value="Вывод"/>	
Частота колебаний вибровозбудителя, Гц для уплотнения грунта начальной плотности	30
Частота колебаний вибровозбудителя, Гц для уплотнения грунта требуемой плотности	30
Выходные данные	
<input type="button" value="Параметры катка"/>	
Вынуждающая сила вибровозбудителя, Н	243000
Рабочая скорость катка, км/ч	1.9
Толщина уплотняемого слоя грунта, м	0.45
Масса уплотняемого грунта, кг	1827
Виброускорения массы уплотняемого грунта, м/с²	21.2

Рис. 1. Реализация методики обоснования режимных параметров вибрационных катков в программном продукте Microsoft Visual Basic

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В таблице 2 представлены значения рекомендуемых параметров катка Hammm 3518.

Применение результатов проведенных исследований позволит повысить производительность и эффективность использования вибрационных катков.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАТКА

Параметры	Грунт	k_y	f , Гц	m_1 , кг	h , м	P , кН	v , м/с
Значения	Связный	1,0	30	2230	0,5	243	0,5

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация) : учебное пособие для вузов / В. Б. Пермяков, В. И. Иванов, С. В. Мельник и др. / под. ред. В. Б. Пермякова. – М.: «ИД «БАСТЕТ», 2014. – 752 с.
2. Тюремнов, И. С. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных катков для уплотнения грунта / И. С. Тюремнов, И. С. Филатов, А. А. Игнатьев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2014. – № 2 (33). – С. 155-162.
3. Савельев, С.В. Техническая эксплуатация строительной и нефтегазовой техники : учебное пособие / С. В. Савельев, И. К. Потеряев. – Омск : СибАДИ, 2016. – 234 с.
4. Хархута, Н. Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н. Я. Хархута, Ю.М. Васильев. – М. : Транспорт, 1975. – 288 с.
5. Пиковский, Я. М. Дорожные машины и оборудование. Машины и заводы для постройки дорожных покрытий : учебник для вузов / Я. М. Пиковский; под. ред. Я. М. Пиковского. – М. : Машгиз, 1960. – 604 с.
6. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов : учебное пособие / С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
7. Трофимов, В. Т. Грунтоведение / В.Т. Трофимов и др.; ред. В.Т. Трофимов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
8. Баркан, Д. Д. Устройство оснований сооружений с применением вибрирования / Д. Д. Баркан. – М.: Издательство министерства строительства предприятий машиностроения, 1949. – 121 с.
9. Костельов, М. П. Возможность и эффективность уплотнения виброкатками грунтов различного типа и состояния / М. П. Костельов // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии». – 2004. – С. 72-82.
10. Савельев, С. В. Применение алгоритма определения параметров вибрационных катков с учетом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации / С.В. Савельев, Г.Г. Бурый, И.К. Потеряев // Вестник СибАДИ. – 2015. – №6. – С. 32 – 37.
11. Уплотнение грунтов обратных засыпок в стесненных условиях строительства / Госстрой СССР. Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт организации, механизации и технической помощи строительству. – М. : Стройиздат, 1981. – 220 с.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661770. Обоснование режимных параметров вибрационных катков с учетом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации // Савельев С. В., Бурый Г. Г. Организация-разработчик: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ). Дата регистрации: 12.11.2014.

METHOD OF JUSTIFICATION OF OPERATIONAL PARAMETERS OF VIBRATING ROLLERS FOR COMPACTION

Annotation. This article investigated the frequency of the oscillation exciter during compaction of soil embankments recommended for vibratory rollers «Raskat». The technique justification regime parameters of vibrating rollers for soil compaction. A program to automate the process of the operation mode for a particular model of vibratory roller with compaction of different soil types. The research will improve the performance and efficiency of the use of vibratory rollers for soil compaction.

Keywords: sealing, vibratory roller, soil, operating parameters, acceleration.

REFERENCES

1. Permjakov V. B., Ivanov V. I., Mel'nik S. V. Tehnologicheskie mashiny i komplekсы v dorozhnom stroitel'stve (proizvodstvennaja i tehničeskaja jekspluacija) [Technological machines and systems in road construction (production and technical maintenance)]. Moscow, «ID «BASTET», 2014. 752 p.
2. Tjurenov I. S., Filatov I. S., Ignat'ev A. A. Obzor rekomendacij proizvoditelej po ispol'zovaniju vibracionnyh katkov dlja uplotnenija grunta [Review the manufacturer's recommendations on the use of vibratory rollers for compacting soil]. Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014, no 2, pp. 155-162.
3. Savel'ev S. V., Poterjaev I. K. Tehničeskaja jekspluacija stroitel'noj i neftegazovoj tehniki [Technical operation of the construction and oil and gas equipment]. Omsk, SibADI, 2016. 234 p.
4. Harhuta N. J., Vasil'ev J.M. Pročnost', us-tojčivost' i uplotnenie gruntov zemljanogo polotna avtomobil'nyh dorog [The strength, stability and compaction of soil subgrade of highways]. Moscow, Transport, 1975. 288 p.
5. Pikovskij J. M. Dorozhnye mashiny i oborudovanie. Mashiny i zavody dlja postrojki dorozhnyh pokrytij [Road machines and equipment. Machines and plants for the construction of pavements]. Moscow, Mashgiz, 1960. 604 p.
6. Vjalov S. S. Reologičeskie osnovy mehaniki gruntov [Rheological basics of soil mechanics]. Moscow, Vysshaja škola, 1978. 447 p.
7. Trofimov V. T. Gruntovedenie [Soil]. Moscow, MGU, 2005. 1024 p.
8. Barkan D. D. Ustrojstvo osnovanij sooruzhenij s primeneniem vibrirovanija [Arrangement of the bases structures using vibration]. Moscow, Izdatel'stvo ministerstva stroitel'stva predpriyatij mashinostroenija, 1949. 121 p.
9. Kostel'ov M. P. Vozmožnost' i jeffektivnost' uplotnenija vibrokatkami gruntov različnogo tipa i sostojanija [The possibility and effectiveness of soil compaction vibratory rollers of different type and status]. Katalog-spravočnik «Dorozhnaja tehnika i tehnologij», 2004, pp. 72-82.
10. Savel'ev S. V., Buryj G. G., Poterjaev I. K. Primenenie algoritma opredelenija parametrov vibracionnyh katkov s učetom massy uplotnjaemogo grunta v zone aktivnogo dejstvija vibracii [The use of the algorithm for determining the parameters of vibrating rollers, taking into account the mass of compacted soil in the zone of active vibration action]. Vestnik SibADI, 2015, no 6, pp. 32-37.
11. Uplotnenie gruntov obratnyh zasypok v stesnennyh uslovijah stroitel'stva / Gosstroj SSSR. Central'nyj naučno-issledovatel'skij i proektno-jeksperimental'nyj institut organizacii, mehanizacii i tehničeskoj pomoshhi stroitel'stvu [Soil compaction reverse fillings in the cramped conditions of construction / USSR State Building. Central Research and Design Experimental Institute of the organization, mechanization and technical assistance to build]. Moscow, Strojizdat, 1981. 220 p.
12. Savel'ev S. V., Buryj G. G. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM №2014661770. Obosnovanie rezhimnyh parametrov vibracionnyh katkov s učetom massy uplotnjaemogo grunta v zone aktivnogo dejstvija vibracii [Certificate of state registration of the computer №2014661770. Justification of regime parameters of vibrating rollers, taking into account the mass of compacted soil in the zone of active vibration action]. Certificate RF, no 2014661770, 2014.

Савельев Сергей Валерьевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: saveliev_sergval@mail.ru).

Потеряев Илья Константинович (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: poteryaev_ik@mail.ru).

Бурый Григорий Геннадьевич (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: buryy1989@bk.ru).

Белодед Александр Сергеевич (Омск, Россия) – магистрант кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sashabeloded123@gmail.com).

Sergey V. Saveliev (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Sciences, Ass. Professor, Department of Operation and service of transport-technological machines and systems in construction, Siberian State Automobile and Highway Academy (644080, Russian Federation, Omsk, Mira, 5, e-mail: saveliev_sergval@mail.ru).

