УДК 656.13.08:65.012.12

© Е. В. Куракина, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: elvl_86@mail.ru

© Д. В. Мусияко, аспирант
(Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого)
E-mail: Musiyako@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-245-249

© E. V. Kurakina, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: elvl_86@mail.ru

© D. V. Musiyako, post-graduate student
(Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University)
E-mail: Musiyako@gmail.com

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ УПЛОТНИТЕЛЕЙ

ENSURING STABILITY OF VIBRATORY COMPACTORS

Рассмотрены условия обеспечения устойчивости вибрационных уплотнителей в стесненных условиях городской среды. Представлены классификационные признаки оборудования, особо уделено внимание наиболее значимым для исследования параметрам: величина центробежной силы, масса, возможность получения реверсивного передвижения (реверсивные плиты), тип привода. Представлены схемы вибрационных плит с вибратором направленного и ненаправленного действия. Предложено математическое описание устойчивости вибрационных уплотнителей. Определены реакция под вальцом со стороны опорной поверхности, момент инерции уплотняющей части вибрационного уплотнителя относительно оси вальца в режиме вибрационного трамбования.

Ключевые слова: вибрационная плита, ненаправленное действие, устойчивость, валец, опорная плита.

The paper considers the conditions ensuring the stability of vibratory compactors in cramped urban environment. There are presented classification characteristics of the equipment, special attention is paid to the parameters that are the most important to the study: the magnitude of the centrifugal force, the mass value, availability of reverse movement (reversing plate), the drive type. The authors present the schemes of vibration plates with a vibrator of directional and non-directional action. The mathematical description of the stability of vibrating compactors is offered. The reaction under the drum from the supporting surface is evaluated, as well as the moment of inertia of the sealing part of the vibratory compactor in regard to the axis of the drum in the vibration compaction mode.

Keywords: vibration plate, non-directed action, stability, drum, support plate.

В стесненных условиях мегаполиса наибольшее практическое применение приобрели вибрационные плиты за счет несложного конструктивного исполнения, малой металлоемкости и низкой стоимости относительно аналогов по выполнению функционально-технологических операций [1, 5, 7]. Основными параметрами классификации виброплит являются величина центробежной силы, масса, возможность получения реверсивного передвижения (реверсивные плиты) и тип привода. Наибольшее распространение получили неререверсируемые вибрационные плиты, перемещающиеся только вперед и оснащенные бензиновым двигателем; нередко

встречаются и виброплиты с дизельным двигателем, в основном с большой массой.

Важным конструктивным условием является место расположения вибратора. У вибрационной плиты направленного действия вибратор установлен на плите так, что возбуждающая сила направлена под углом к горизонту (рис. 1). При работе такие плиты на какое-то время полностью утрачивают контакт с уплотняемым материалом. Чем больше величина возбуждающей силы вибратора по отношению к весу, тем продолжительнее этот отрыв [2–4, 6]. В результате уплотнитель сползает вниз даже на незначительных уклонах. Аналогом и усовершенствованным конструктивным исполнением является вид обо-

Рис. 1. Принципиальная схема вибрационной плиты с вибратором направленного действия: 1 — приводной двигатель; 2 — поддрессоренная рама; 3 — вибратор; 4 — рабочая плита; 5 — уплотняемый материал

рудования, где вибратор располагался не по середине уплотнителя, а смещен к передней кромке плиты (рис. 2). В настоящее время различными зарубежными фирмами выпускаются многие десятки типоразмеров самоходных вибрационных плит¹ [11–14], из которых 95 % создаются с вибраторами ненаправленного действия:

В зависимости от конструктивного исполнения вибрационной плиты наибольшую эффективность имеет режим работы, при котором конструктивный массив «задний валец — опорная плита» не отрывается от опорной поверхности, тем самым обеспечивая устойчивость всей конструкции (рис. 3), что является важным фактором при производстве работ.

Представленная на рис. 3 конструкция вибрационного уплотнителя имеет безотрывный конструктивный массив в виде вальца, шарнирно соединенного с плитой. При перемещении вибрационного уплотнителя в нерабочем состоянии, валец помогает достаточно легко перекачивать его с одного места на другое. В случае, когда поверхность плиты уплотнителя отрывается от поверхности, а валец остается в контакте с уплотняемой поверхностью, вибрационная установка работает в режиме вибрационного трамбования, обеспечивая уплотнение импульсом удара [6, 8, 9, 12].

¹ Виброуплотнители с четырехтактным двигателем фирмы Bomag. Viertakter und Variokontrol. Tiefbau.

Рис. 2. Принципиальная схема вибрационной плиты с вибратором ненаправленного действия: 1 — приводной двигатель; 2 — поддрессоренная рама; 3 — вибратор; 4 — рабочая плита; 5 — уплотняемый материал

Уравнения равновесия сил, действующих на уплотняющую часть вибрационного уплотнителя, с учетом направления сил будут иметь вид:

$$\frac{G_2}{g} \ddot{x} = \pm P_x - S_x - R \cdot f \cdot \operatorname{sgn} \ddot{x}, \quad (1)$$

где знак «+» указан при вращении дебаланса по часовой стрелке, знак «-» — при вращении дебаланса против часовой стрелки. Данное условие справедливо на протяжении всей работы вибрационного уплотнителя.

$$\frac{G_2}{g} \ddot{y}_2 = -P_y + R - S_y - G_2 - G_3; \quad (2)$$

$$Y_0 \cdot \ddot{\alpha} = -P_y \cdot \alpha \pm P_x \left(c - \frac{d}{2}\right) + R \cdot l - R \cdot f \cdot \frac{d}{2} \operatorname{sgn} \dot{x} + \frac{G_2}{g} \ddot{x} \left(h - \frac{d}{2}\right) - \frac{G_2}{g} \ddot{y}_2 \cdot b - G_2 \cdot b - G_3 \cdot e, \quad (3)$$

где Y_0 — момент инерции уплотняющей части вибрационного уплотнителя относительно оси вальца.

Обеспечение устойчивости вибрационного уплотнителя выполняется исходя из условия, что $y_1 = \operatorname{const} = 0$. Тогда реакция в точке крепления рамы к оси вала будет иметь вид:

$$S_y = G_1 - Q. \quad (4)$$

Из рис. 3 следует, что угол отклонения рамы относительно вальца имеет вид:

$$\alpha = \frac{y_2}{b}; \Rightarrow \alpha = \frac{y_2}{b}. \quad (5)$$

В случае, когда в процессе выполнения работы опорная уплотняющая часть вибрационного уплотнителя большую часть времени находится в воздухе, т. е. не опирается на уплотняемую поверхность, воздействуя на нее лишь импульсом удара, принимаем реакцию грунта R , равную 0. Тогда момент инерции уплотняющей части вибрационного уплотнителя относительно оси вальца будет иметь вид:

Рис. 3. Схема воздействия сил на вибрационный уплотнитель: 1 — валец; 2 — вибратор; G_1 — вес вальца, кг; G_2 — вес вибрирующей рамы с вибратором, кг; G_3 — вес поддрессоренного двигателя, кг; m — масса уплотнителя, кг; a — расстояние от оси вальца до оси вибратора; b — расстояние от оси вальца до центра опорной поверхности, см; c — высота от оси вибратора до опорной поверхности, см; d — диаметр вальца, см; e — расстояние от оси вальца до центра поддрессоренного двигателя, см; h — расстояние от опорной поверхности до центра инерции вибрирующей рамы с вибратором, см; l — расстояние от оси вальца до реакции грунта, см; F — сила трения со знаком скорости, Н; f — коэффициент трения скольжения; P — возбуждающая сила вибратора, Н; R — реакция грунта; Q_1 — центр вальца; Q_2 — центр инерции вибрирующей рамы с вибратором; Q_3 — центр поддрессоренного двигателя; S_x и S_y — реакции в точке крепления рамы к оси вала; Q — реакция под валцом со стороны опорной поверхности; T_k — сила сопротивления качению (перекачиванию) катка; α — угол отклонения рамы уплотнителя относительно оси вальца; β — угол поворота вальца; μ — коэффициент сопротивления качению

$$Y_0 \frac{y_2}{b} = -P_y \cdot a \pm P_x \left(c - \frac{d}{2}\right) + \frac{G_2}{g} x \left(h - \frac{d}{2}\right) - \frac{G_2}{g} y_2 \cdot b - G_2 \cdot b - G_3 \cdot e. \quad (6)$$

Учитывая силы, воздействующие на уплотняющую часть вибрационного уплотнителя, а также $R = 0$, момент инерции уплотняющей части вибрационного уплотнителя относительно оси вальца примет вид:

$$Y_0 \frac{g}{b \cdot G_2} (-P - S_y - G_2 - G_3) = -P_y \cdot a \pm P_x \left(c - \frac{d}{2}\right) + \frac{G_2}{g} \ddot{x} \left(h - \frac{d}{2}\right) - (-P_y - S_y - G_2 - G_3)b - G_2 \cdot b - G_3 \cdot e. \quad (7)$$

Учитывая реакцию в точке крепления рамы к оси вала, формула (7) примет вид:

$$Y_0 \frac{g}{b \cdot G_2} (-P_y + Q - G_1 - G_2 - G_3) = -P_y \cdot a \pm P_x \left(c - \frac{d}{2}\right) + \frac{G_2}{g} \ddot{x} \left(h - \frac{d}{2}\right) - (-P_y + Q - G_1 - G_3)b - G_3 \cdot e. \quad (8)$$

Учитывая воздействие сил на валец и на уплотняющую часть вибрационного уплотнителя, реакцию грунта, равную нулю, получаем

$$\ddot{x} = (\pm P_x - Q \cdot \mu \cdot \operatorname{sgn} \dot{x}) \frac{g}{G_1 + G_2}. \quad (9)$$

Для режима работы, при котором конструктивный массив «задний валец — опорная плита» не отрывается от опорной поверхности, примем некоторые условия. Первое: $Y_0 = \frac{G_2}{g} b^2$, тогда реакция под валцом со стороны опорной поверхности будет определяться:

$$Q = \frac{-P_y \cdot a \pm P_x \left[\left(c - \frac{d}{2}\right) - \frac{G_2}{G_1 + G_2} \left(h - \frac{d}{2}\right) \right] + 2 \cdot b \left(P_y + G_1 + \frac{G_2}{2} + G_3\right) - G_3 \cdot e}{2 \cdot b + \mu \cdot \operatorname{sgn} \dot{x} \frac{G_2}{G_1 + G_2} \left(h - \frac{d}{2}\right)}. \quad (10)$$

Если принять второе условие: $h = \frac{d}{2}$, т. е. что центр инерции вибрирующей части расположен на высоте оси вальца, то формула (10) примет вид:

$$Q = \frac{P_y(2 \cdot b - a) \pm P_x(c - \frac{d}{2}) + 2 \cdot b(G_1 + \frac{G_2}{2} + G_3) - G_3 \cdot e}{2 \cdot b}. \quad (11)$$

При допущении третьего условия $a = 2 \cdot b$, а также выполнив необходимые преобразования, формула (11) примет вид

$$Q = \pm P_x \frac{(c - \frac{d}{2})}{2 \cdot b} + G_1 + \frac{G_2}{2} + G_3(1 - \frac{e}{2 \cdot b}). \quad (12)$$

Таким образом, следует условие, при котором реакция под вальцом со стороны опорной поверхности $Q > 0$, валец всегда в контакте с уплотняемой поверхностью, и возбуждающая сила вибратора имеет вид:

$$\pm P \geq \frac{G_3(e - 2 \cdot b) - (G_1 + \frac{G_2}{2})2 \cdot b}{c - \frac{d}{2}}. \quad (13)$$

При этом Q и сила сопротивления перемещению находятся в одной фазе или в противофазе с горизонтальной составляющей возбуждающей силы вибратора, т. е. сопротивление передвижению оказывается больше или меньше, когда эта сила сдвигает уплотнитель вперед. Таким образом, обеспечивается эффект вибрационного перемещения назад или вперед (рис. 4), что обусловлено изменением направления вращения дебалансов вибратора.

Рис. 4. График зависимости Q от P_x

Таким образом, устойчивость вибрационной плиты, в частности при рассмотрении конструктивного массива «задний валец — опорная плита», обеспечивается исходя из условий $Y_0 = \frac{G_2}{b^2}$, $h = \frac{d}{2}$, $a = 2 \cdot b$. Конструктивное исполнение выглядит так: центр тяжести вибрирующей части уплотнителя, т. е. его плиты с вибратором, должен быть расположен на высоте оси вальца и находиться посередине между осью вальца и осью вращения дебаланса. Этого можно достигнуть изменением расположения вибратора, варьированием диаметра вальца или используя дополнительную пригрузку, устанавливаемую на плите. При направлении вращения дебалансов против часовой стрелки и расположении вибратора выше центра инерции вибрационный уплотнитель будет передвигаться вперед.

Библиографический список

1. Башкарев А. Я., Мусияко Д. В., Пешиков В. С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя // Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. «Современное машиностроение. Наука и образование». СПб.: СПбГПУ, 2013.
2. Башкарев А. Я., Мусияко Д. В., Пешиков В. С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1 (166). С. 175–178.
3. Башкарев А. Я., Мусияко Д. В., Расулов Р. А. Компоновка самоходных вибрационных уплотнителей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 4 (231). С. 163–169.
4. Вавилов А. В., Леонович И. И., Максименко А. Н. Дорожно-строительные машины: учебник для вузов. Минск: Технопринт, 2000. 515 с.
5. Евтюков С. А., Шапунов М. М. Пневматический транспорт в строительстве: учебник / под общ. ред. С. А. Евтюкова. СПб.: ООО ИД «Петрополис», 2012. 306 с.
6. Куракина Е. В. Эффективность использования наземных транспортно-технологических машин // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 203–208.
7. Куракина Е. В. Повышение эффективности эксплуатации наземных транспортно-технологических машин в зимних условиях // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 205–212.
8. Куракина Е. В., Шиманова А. А., Лялинов А. Н. Совершенствование системы управления жизненным циклом наземных транспортно-технологических

машин // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 200–206.

9. Куракина Е. В., Степина П. А., Дружинин В. М. Комплексная механизация земляных работ в условиях отрицательных температур // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 4 (63). С. 182–187.

10. Kurakina E., Evtyukov S. Improvement of the system for accounting of parameters during construction of motor roads. *Architecture and Engineering*. 2017. Vol. 2. № 3, Pp. 34–42.

11. Куракина Е. В., Евтюков С. С. Инженерно-техническая экспертиза наземных транспортных средств: учеб. пособие. СПб.: СПбГАСУ, 2016. 82 с.

12. Куракина Е. В., Грушецкий С. М. Техническая эксплуатация наземных транспортно-технологических машин // Материалы 69-й междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторов «Актуальные проблемы БДД». СПб.: СПбГАСУ, 2016. С. 112–117.

13. Евтюков С. А., Евтюков С. С., Чудаков А. В., Куракина Е. В. Наземные транспортно-технологические машины: учебник / под общ. ред. С. А. Евтюкова. СПб.: ООО ИД «Петрополис», 2016. 504 с.

14. Волков С. А., Евтюков С. А. Строительные машины: учебник для строит. вузов / под общ. ред. С. А. Волкова. СПб.: ДНК, 2008. 704 с.

References

1. Bashkarev A. Ya., Musiyako D. V., Peshkov V. S. *Vibratsionnoe peremeshchenie poverkhnostnogo uplotnitelya* [Vibrational displacement of the surface compactor]. *Trudy 3-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie»* [Proc. of the 3-rd Int. sci.-pract. conf. "Modern mechanical engineering. Science and education"]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2013.

2. Bashkarev A. Ya., Musiyako D. V., Peshkov V. S. *Vibratsionnoe peremeshchenie poverkhnostnogo uplotnitelya* [Vibrational displacement of the surface compactor]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti – Scientific-Engineering Bulletin*, SPbSPU Publ., 2013, no. 1 (166), pp. 175–178.

3. Bashkarev A. Ya., Musiyako D. V., Rasulov R. A. *Komponovka samokhodnykh vibratsionnykh uplotniteley* [Design of self-propelled vibration compactors]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti – Scientific-Engineering Bulletin*, SPbSPU Publ., 2015, no. 4 (231), pp. 163–169.

4. Vavilov A. V., Leonovich I. I., Maksimenko A. N. *Dorozhno-stroitel'nye mashiny. Uchebnik dlya vuzov* [Road-building machines. Textbook for higher schools]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2000, 515 p.

5. Evtyukov S. A., Shapunov M. M. *Pnevmaticheskiy transport v stroitel'stve. Uchebnik* [Pneumatic transport

in construction. Textbook]. Ed. by Evtyukov S. A. St. Petersburg, Petropolis Publ., 2012, 306 p.

6. Kurakina E. V. *Ehffektivnost' ispol'zovaniya nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin* [The efficiency of using land transport technological machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56), pp. 203–208.

7. Kurakina E. V. *Povyshenie ehffektivnosti ehkspluatatsii nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin v zimnikh usloviyakh* [Increasing the efficiency of operation of land transport technological machines in winter conditions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 205–212.

8. Kurakina E. V., Shimanova A. A., Lyalinov A. N. *Sovershenstvovanie sistemy upravleniya zhiznennym tsiklom nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Improving the management system of the life cycle of ground transport and technological machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 3 (62), pp. 200–206.

9. Kurakina E. V., Stepina P. A., Druzhinin V. M. *Kompleksnaya mekhanizatsiya zemlyanykh rabot v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur* [Complex mechanization of earthwork operations in conditions of subzero temperatures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 4 (63), pp. 182–187.

10. Kurakina E., Evtyukov S. Improvement of the system for accounting of parameters during construction of motor roads. *Architecture and Engineering*, 2017, vol. 2, no. 3, pp. 34–42.

11. Kurakina E. V., Evtyukov S. S. *Inzhenerno-tekhnicheskaya ehkspertiza nazemnykh transportnykh sredstv. Ucheb. posobie* [Technical examination of land vehicles. Teaching manual]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2016, 82 p.

12. Kurakina E. V., Grushetskiy S. M. *Tekhnicheskaya ehkspluatatsiya nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Technical operation of land transport technological machines]. *Trudy 69-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i doktorov «Aktual'nye problemy BDD»* [Proc. of the 69-th Int. sci.-pract. conf. of students, graduate students, young scientists and doctors "Current problems of road traffic safety"]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2016, pp. 112–117.

13. Evtyukov S. A., Evtyukov S. S., Chudakov A. V., Kurakina E. V. *Nazemnye transportno-tekhnologicheskie mashiny: uchebnik* [Land transport technological machines. Textbook]. Ed. by Evtyukov S. A. St. Petersburg, Petropolis Publ., 2016, 504 p.

14. Volkov S. A., Evtyukov S. A. *Stroitel'nye mashiny. Uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov* [Construction machines. Textbook for construction higher schools]. Ed. by Volkov S. A. St. Petersburg, DNK Publ., 2008, 704 p.