ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ. МЕХАНИЗМЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК: 693.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.774-779

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЕТОНОУКЛАДЧИКА МАЛЫХ ФОРМ

Е.С. Горских, Р.Т. Емельянов, Г.П. Баранова, Е.С. Турышева, Э.И. Османов

Сибирский федеральный университет (СФУ), 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82а

АННОТАЦИЯ. Описан анализ процесса виброформования инженерных изделий с помощью бетоноукладчика. Разработана конструкция экспериментального образца бетоноукладчика малых форм. Приведены результаты исследования динамики оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: формообразование, математическая модель, вибратор, частота колебательного процесса, амплитуда колебаний, амплитуда ускорения, масса, частота вращения дебаланса, объем бетонной смеси, жесткость амортизатора, жесткость бункера, вязкость бетонной смеси

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Горских Е.С., Емельянов Р.Т., Баранова Г.П., Турышева Е.С., Османов Э.И. Моделирование динамики бетоноукладчика малых форм // Вестник МГСУ. 2017. Том. 12. Вып. 7 (106). С. 774–779. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.774-779

DYNAMIC SIMULATION OF CONCRETE DISTRIBUTOR OF SMALL SCALE

E.S. Gorskikh, R.T. Emelyanov, G.P. Baranova, E.S. Turysheva, E.I. Osmanov

Siberian Federal University (SFU), 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

ABSTRACT. The analysis of the vibromolding process for engineering products was given. The design experimental model of concrete distributor of small scale was developed. The results of research on dynamic simulation of machinery were set out.

KEY WORDS: structural morphology, mathematical model, concrete vibrator, vibrational frequency, amplitude of vibration, acceleration, mass, frequency of vibrator eccentric mass rotation, size of the concrete pour, stiffness of suspension, stiffness of a hopper, viscosity of concrete mixture

FOR CITATION: Gorskikh E.S., Emelyanov R.T., Baranova G.P., Turysheva E.S., Osmanov E.I. Modelirovanie dinamiki betonoukladchika malyykh form [Dynamic Simulation of Concrete Distributor of Small Scale]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 7 (106), pp. 774–779. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.774-779

Формообразование инженерных изделий осуществляется бетоноукладчиком под воздействием сил вибрации, создающихся вибратором, который жестко закреплен на боковой поверхности бункера. Под воздействием вибрации изменяется не только видимый, но и действительный коэффициент трения строительной смеси вследствие происходящих физико-механических процессов [1–3]. С помощью вибрации также осуществляется передвижение бетонной смеси в направлении движения укладчика при включении вибратора.

На качество барьеров безопасности влияют характеристики вибрационного оборудования в части регулирования частоты колебательного процесса. Существующие конструкции вибрационных формовочных машин, как правило, обеспечивают один какой-либо режим вибрационного воздействия на бетонную смесь. При таких параметрах

хорошо прорабатывается бетонная смесь на высоту до 20...30 см. Бетонная смесь в изделиях большой высоты при указанных параметрах вибрирования уплотняется плохо вследствие значительного затухания амплитуды колебаний. В этом случае уплотнение целесообразно вести при более низкой частоте вибрирования (16...25 Гц) и повышенной амплитуде колебаний (3...4 мм) [4–6].

На практике часто возникает необходимость формировать изделия переменного сечения, имеющие как горизонтальные, так и вертикальные элементы (например, тавровые балки, короба и т.д.). Существующие методы формирования не обеспечивают оптимальных условий изготовления всех элементов. При формировании таких изделий вибраторами с гармоническими колебаниями плохо уплотняются вертикальные элементы [7]. При формировании на низкочастотном уровне с ограничителем пере-

мещения плохо уплотняются горизонтальные элементы, так как при наличии ударного воздействия и отсутствии давления столба смеси частицы этой смеси отрываются друг от друга и происходит разуплотнение. Для обеспечения непрерывности формообразования инженерного сооружения требуется обеспечение рационального сочетания динамических характеристик бетоноукладчика и свойств укладываемой бетонной смеси.

Система формообразования может рассматриваться как колебательное звено второго порядка. Все это определило необходимость разработки методов формования бетонных изделий, обеспечивающих качество устройства инженерного оборудования.

Объектом исследований выбран бетоноукладчик, экспериментальный образец которого приведен на рис. 1.

Для моделирования процессов виброформования инженерных изделий принята динамическая модель бетоноукладчика, приведенная на рис. 2.

Процесс виброформования бетоноукладчиком описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} (m_0 + \rho\vartheta)\ddot{x} + b_2\dot{x} + c_2x = m R\omega^2 \cos\omega t \sin\gamma; \\ (m_0 + \rho\vartheta)\ddot{y} + c_1y - (m_0 + \rho\vartheta)g = m R\omega^2 \sin\omega t \cos\gamma, \end{cases}$$

где m_0 — масса колебательной системы; ρ — плотность строительной смеси; $x, \dot{x}, \ddot{x}$ — перемещение, скорость и ускорение системы соответственно; b_2 — вязкость строительной смеси; c_2 — жесткость бункера; c_1 — жесткость амортизатора; g — ускорение свободного падения; m_d — масса дебаланса вибратора; R — радиус эксцентриситета; ω — частота вращения дебаланса; t — время работы; γ — угол наклона стенок бункера.

Рис. 1. Экспериментальный образец бетоноукладчика малых форм: 1 — бункер; 2 — вибратор; 3 — скользящая опалубка; 4 — бетонное изделие

Рис. 2. Динамическая модель бетоноукладчика: m_0 — масса колебательной системы; x — перемещение системы; c_2 — жесткость бункера; c_1 — жесткость амортизатора; m_d — масса дебаланса вибратора; R — радиус эксцентриситета

Математическая модель описывает процесс формообразования, пока смесь не достигнет максимальной плотности: $0 < \rho < \rho_{\max}$.

Для моделирования поведения динамических систем, к которым относится и процесс виброформирования инженерных сооружений, использовался пакет MATLAB Simulink [8–10]. Опишем значения постоянных параметров математической модели:

Параметр	Значение
Масса колебательной системы m_0 , кг	100,000
Масса дебаланса вибратора m_d , кг	10,000
Радиус эксцентриситета R , м	0,008
Частота вращения дебаланса W , рад/с	300,000
Угол сдвига фаз U , рад	0,500
Объем бетонной смеси V , м ³	1,000
Жесткость амортизатора c_1 , Н/м	0,5; 10; 100
Жесткость бункера c_2 , Н/м	0,5; 10; 100
Время работы t , с	10; 100; 200
Вязкость бетонной смеси b_2 , Па/с	25; 100; 200

Главным критерием работоспособности в режиме воздействия на него вибрационных нагрузок является амплитуда колебаний бункера и ее вторая производная ускорения [11–15]. Для обеспечения минимизации вибрационных сил в конструкции виброформовочной установки предусмотрены гасители вибрации в виде амортизирующих элементов. В числе других параметров, влияющих на величину динамической нагруженности, являются: масса колебательной системы, масса дебаланса вибратора, радиус эксцентриситета, частота вращения дебаланса, угол сдвига фаз, объем бетонной смеси, жесткость амортизатора, жесткость бункера, время работы [16–20]. Результаты моделирования представлены в графическом виде.

На рис. 3 представлены переходные процессы колебаний бункера бетоноукладчика в вертикальной плоскости.

При варьировании плотностью смеси от 1800 до 3000 кг/м³ и при вязкости смеси 200 Па/с результаты математических вычислений показали, что амплитуда колебаний вибросистемы составила от 0,9 до 3,0 мм. Значение амплитуды колебаний в вертикальной и горизонтальной плоскостях существенных отличий не имеет. Ускорения элементов системы колеблются от 0,2 до 3,0 м/с².

Ускорения, возникающие в вертикальной плоскости, превышают ускорения по горизонтальной плоскости. Их значения по плоскостям распределились следующим образом:

- ускорения в вертикальной плоскости изменялись от 0,7 до 3,0 м/с²;
- ускорения в горизонтальной плоскости — от 0,2 до 0,9 м/с².

На рис. 4 приведены зависимости амплитуды колебаний и ускорений бункера бетоноукладчика от плотности бетонной смеси.

При этом с увеличением плотности смеси амплитуда колебаний увеличивается, а ускорение элементов системы уменьшается.

При вязкости смеси 200 Па/с изменение значений амплитуды колебаний и ускорений бункера незначительно. С увеличением времени вибрирования до 300 с амплитуда колебаний снизилась незначительно, ускорения несколько увеличились: в вертикальной плоскости — до 3,62...6,33 м/с², в горизонтальной плоскости — до 0,5...0,9 м/с².

Таким образом, для обеспечения минимизации воздействия вибрационных сил получены зависимости колебательного процесса бетоноуклад-

Рис. 3. Колебательные процессы в вертикальной плоскости

Рис. 4. Зависимости амплитуды колебаний и ускорений бункера бетоноукладчика от плотности бетонной смеси:
1 — вертикальная плоскость; 2 — горизонтальная плоскость

чика амплитуды колебаний и ускорений бункера от жесткости упругих связей конструкции, а также времени вибрирования.

Реализация аналитических зависимостей колебательного процесса оборудования показала, что виброускорения и амплитуда колебаний бункера

уменьшаются с увеличением плотности шихты и жесткости амортизатора. С увеличением времени вибрирования ускорения увеличиваются незначительно, не превышая нормативных санитарно-гигиенических значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов Р.Т., Прокопьев А.П., Турышева Е.С., Постоев П.А. Исследование процесса вибрационного формования в технологиях инженерного обустройства автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. 2010. № 10. С. 44–48.
2. Постоев П.А. Защита бордюроукладчика от вибрации // Молодежь и наука : сб. мат. Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. С. 154–157.
3. Постоев П.А., Цыганкова А. В. Влияние колебательного процесса на динамические параметры бункера укладчика бетонной смеси // Инновации и актуальные проблемы техники и технологий : мат. всеросс. науч.-техн. конф. молодых ученых : Т. 2. Саратов, 2010. С. 187–189.
4. Лоценко А.Л., Копица С.П., Бикбау М.Я. Строительно-индустриальный кластер — передовые технологии и машиностроение для строительства // Технологии бетонов. 2013. № 8. С. 28–30.
5. Бикбау М.Я. Новые цементы и бетоны. Открытие явления нанокапсуляции дисперсных веществ // ЖБИ и конструкции. 2012. № 4. С. 67–72.
6. Инструкция по продолжительности и интенсивности вибрации и по подбору состава бетонной смеси и повышенной удобоукладываемости : 2-е изд. М. : Госстрой СССР, НИИЖБ, 1968.
7. Копица С.П., Зайкин В.А. Технология безопалубочного формования — ключ к модернизации промышленности и снижению себестоимости жилья // Технологии бетонов. 2013. № 11. С. 29–33.
8. Черных И.В. SIMULINK: Среда создания инженерных приложений / под общ. ред. канд. техн. наук В.Г. Потемкина. М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.
9. Таха Х.А. Введение в исследование операций : пер. с англ.; 7-е изд. М. : Вильямс, 2007. 912 с.
10. Емельянов Р.Т., Спирин Е.С., Кирилов К.В., Цыганкова А.В. Исследования автоматической системы управления с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулированием // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2013. № 10. С. 243–247.
11. Емельянов Р.Т., Серватинский В.В., Прокопьев А.П., Новрузов В.С. Моделирование системы управления частотой вращения вала шнекового распределителя материала // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2016. № 5 (116). С. 106–110.
12. Прокопьев А.П., Иванчура В.И., Емельянов Р.Т., Тороков А.А. Частотный метод синтеза регулятора системы управления для мобильных машин // Автоматизация и управление в технических системах. 2015. № 2 (14). С. 83–97.
13. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelianov R.T. The Analytical Solution and the Dynamic Characteristics of the System Model Velocity Control Vibrating Roller // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. 2014. Т. 7. № 4. С. 480–488.
14. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelianov R.T., Turysheva E.S. Researching application of fuzzy controller in systems grade and slope control for asphalt paver //

Applied and Fundamental Studies : proceedings of the 3rd International Academic Conference. August 30–31 2013. St Louis : Publishing House Science and Innovation Center, Ltd, 2013. Pp. 85–89.

15. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. СПб. : Питер, 2005. 333 с.

16. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления: 4-е изд. СПб. : Профессия, 2003. 752 с.

17. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б.И. Копылова. М. : Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004. 832 с.

18. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления / пер. с англ. А. Японешникова. М. : Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004. 912 с.

19. Паршин Д.Я. Математические модели строительных роботов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 4. С. 3–9.

20. Bennighof J.K., Lehoucq R.B. An automated multilevel substructuring method for eigenspace computation in linear elastodynamics, submitted to SIAM // Journal of Scientific Computing. 2002. Vol. 25 (6). Pp. 2084–2106.

Поступила в редакцию в октябре 2016 г.

Принята в доработанном виде в апреле 2017 г.

Одобрена для публикации в июне 2017 г.

Об авторах: **Горских Евгения Сергеевна** — магистр кафедры строительных материалов и технологий строительства; **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82а, gorskikh.evgeniya@mail.ru.

Емельянов Юрий Тимофеевич — доктор технических наук, профессор кафедры инженерных систем зданий и сооружений, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82а, ert-44@yandex.ru;

Баранова Галина Павловна — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов и технологий в строительстве; **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82а, putinar@mail.ru;

Турышева Евгения Сергеевна — кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем зданий и сооружений, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82а, macgassa@yandex.ru;

Османов Эльшад Ильхам — аспирант кафедры автомобильных дорог и городских сооружений, **Сибирский федеральный университет (СФУ)**, 660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, д. 82а, osmanov03@mail.ru;

REFERENCES

1. Emelyanov R.T., Prokopiev A.P., Turysheva E.S., Postoyev P.A. Issledovanie protsessa vibratsionnogo formovaniya v tekhnologiyakh inzhenernogo obustroystva avtomobil'nykh dorog [Investigation of the Vibroforming Process in the Technologies of Creating Road Facilities]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and Road Machines]. 2010, no. 10, pp. 44–48. (In Russian)

2. Postoev P.A. Zashchita bordyuroukladchika ot vibratsii [Protection of the Border Placer Against Vibration]. *Molodezh' i nauka: sbornik materialov vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Youth and Science: Collected Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists]. Krasnoyarsk, Siberian federal university, 2011, pp. 154–157. (In Russian)

3. Postoev P.A., Tsygankova A.V. Vliyanie kolebatel'nogo protsess na dinamicheskie parametry bunkera ukladchika betonnoy smesi [Influence of the Oscillatory Process on the Dynamic Parameters of the Paver's Bunker]. *Innovatsii i aktual'nye problemy tekhniki i tekhnologii: materialy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh: t. 2* [Innovations and actual problems of engineering and technology: Proceedings of the All-Russian. Scientific and technical Conference of the Young Scientists: vol. 2]. Saratov, 2010, pp. 187–189. (In Russian)

4. Loshchenko A.L., Kopsha S.P., Bikbau M.Ya. Stroitel'no-industrial'nyy klaster — peredovye tekhnologii i mashinostroenie dlya stroitel'stva [Construction and Industrial Cluster — Advanced Technologies and Engineering for

Construction]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2013, no. 8, pp. 28–30. (In Russian)

5. Bikbau M.Ya. Novye tsementy i betony. Otkrytie yavleniya nanokapsulyatsii dispersnykh veshchestv [New Cements and Concretes. the Discovery of the Phenomenon of the Dispersed Substances Nanocapsulation]. *ZHBI i konstruktivnykh* [Concrete Goods and Constructions]. 2012, no. 4, pp. 67–72. (In Russian)

6. *Instruktsiya po prodolzhitel'nosti i intensivnosti vibratsii i po podboru sostava betonnoy smesi i povyshennoy udoboukladyvaemosti* [Regulation on the Duration and Intensity of Vibration and on the Selection of the Composition of Concrete Mix and the Increased Workability]. 2nd ed. Moscow, Gosstroy SSSR Publ., NII ZHB Publ., 1968. (In Russian)

7. Kopsha S.P., Zaykin V.A. Tekhnologiya bezopasnoy formovaniya — klyuch k modernizatsii promyshlennosti i snizheniyu sebestoimosti zhil'ya [Technology of Form-Free Molding — the Key to Modernizing the Industry and Reducing the Housing Cost]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Goods and Constructions]. 2013, no. 11, pp. 29–33. (In Russian)

8. Chernykh I.V. *SIMULINK: Sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy* [SIMULINK: The Environment for Creating Engineering Applications]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2003, 496 p. (In Russian)

9. Taha H.M. *Operations Research: An Introduction : 9th Edition*. Upper Saddle River, Prentice Hall, 2002, 832 p.

10. Emelyanov R.T., Spirin E.S., Kirilov K.V., Tsygankova A.V. Issledovaniya avtomaticheskoy sistemy up-

ravleniya s proporsional'no-integral'no-differentsial'nym regulirovaniem [Investigations of the Automatic Control System with Proportional-Integral-Differential Control]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Krasnoyarsk Agrarian University]. 2013, no. 10, pp. 243–247. (In Russian)

11. Emelyanov R.T., Servatinskiy V.V., Prokopiev A.P., Novruzov V.P. Modelirovanie sistemy upravleniya chastotoy vrashcheniya vala shnekovogo raspredelatelya materiala [Modeling of the Control System of the Rotational Speed of the Shaft of the Material Screw Distributor]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Krasnoyarsk Agrarian University]. 2016, no. 5 (116), pp. 106–110. (In Russian)

12. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelyanov R.T., Torokov A.A. Chastotnyy metod sinteza regulatora sistemy upravleniya dlya mobil'nykh mashin [Frequency Method of Control System Controller Synthesis for Mobile Machines]. *Avtomatizatsiya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh* [Automation and Control in Technical Systems]. 2015, no. 2 (14), pp. 83–97. (In Russian)

13. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelyanov R.T. The Analytical Solution and the Dynamic Characteristics of the System Model Velocity Control Vibrating Roller. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Magazine of the Siberian Federal University. Series: Technology and technology]. 2014, vol. 7, no. 4, pp. 480–488. (In Russian)

14. Prokopiev A.P., Ivanchura V.I., Emelyanov R.T., Turysheva E.S. Researching Application of Fuzzy Control-

ler in Systems Grade and Slope Control for Asphalt Paver. *Applied and Fundamental Studies : Proceedings of the 3rd International Academic Conference. August 30–31 2013*. St Louis, Publishing House Science and Innovation Center Ltd, 2013, pp. 85–89.

15. Miroshnik I.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Lineynye sistemy* [Automatic Control Theory. Linear systems]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2005, 333 p. (In Russian)

16. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of the Automatic Control Systems]. 4th ed. Saint-Petersburg, Professiya Publ., 2003, 752 p. (In Russian)

17. Dorf R.C., Bishop R.H. *Modern control systems: 9th edition*. Upper Saddle River, Prentice Hall International, 2001, 752 p.

18. Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgado M.E. *Control System Design*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 908 p.

19. Parshin D.Ya. Matematicheskie modeli stroitel'nykh robotov [Mathematical Models of the Construction Robots]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-caucasian Region. Technical Sciences Series]. 2006, no. 4, pp. 3–9. (In Russian)

20. Bennighof J.K., Lehoucq R.B. An Automated Multilevel Substructuring Method for Eigenspace Computation in Linear Elastodynamics, Submitted to SIAM. *Journal of Scientific Computing*. 2002, vol. 25 (6), pp. 2084–2106.

Received in October 2016.

Adopted in revised form in April 2017.

Approved for publication in June 2017.

About the authors: **Gorskikh Evgeniya Sergeevna** — Master, Department of Construction Materials and Construction Technologies, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; Gorskikh.evgeniya@mail.ru.

Emelyanov Ryurik Timofeevich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of the Buildings and Structures Engineering Systems, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ert-44@yandex.ru;

Baranova Galina Pavlovna — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Materials and Technologies in Construction; **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; putinap@mail.ru;

Turysheva Evgeniya Sergeevna — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of the Buildings and Structures Engineering Systems, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; macgassa@yandex.ru;

Osmanov Elshad Ilham — Post-graduate Student, Department of Roads and Urban Structures, **Siberian Federal University (SFU)**, 82 Svobodnyy prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; osmanov03@mail.ru.