

DOI: 10.12737/article_58e61337d63a68.64463622

Теличенко В.И., д-р техн. наук, проф.,
Васильев В.Г., канд. техн. наук, доц.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ИМПУЛЬСОВ В БЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ УДАРНО-ВИБРАЦИОННОМ ФОРМОВАНИИ

PRESIDENT@mgsu.ru

Повышение эффективности виброформования бетонных и железобетонных изделий неразрывно связано с выбором рациональных режимов вибрационных воздействий на уплотняемую смесь и оптимальных параметров виброоборудования. В статье рассматриваются вопросы распространения волнового пакета при ударно-вибрационном воздействии на форму с бетонной смесью и исследуется спектр импульсов, распространяющихся в бетонной смеси. Проведенные исследования свидетельствуют, что спектр волнового пакета при ударно-вибрационном воздействии на форму с бетонной смесью содержит большое число гармоник, амплитуды которых изменяются по нелинейному закону в зависимости от параметров системы, основным из которых является жесткость упругого элемента между формой с бетонной смесью и рабочим органом формирующей машины. Таким образом, изменяя жесткость упругих прокладок можно в широких пределах изменять амплитудно-частотный спектр колебаний, распространяющихся в бетонной смеси, и тем самым регулировать интенсивность процесса виброформования. Результаты теоретических и экспериментальных исследований хорошо согласуются с работами по созданию виброплощадок с регулируемыми параметрами и виброплощадок со свободно устанавливаемой на вибростоле формой.

Ключевые слова: *вибрационное формование, бетонная смесь, спектр колебаний.*

Вопросы теории и практики вибрационного уплотнения бетонных смесей до сих пор актуальны в производстве железобетонных изделий и конструкций [1–3]. Основными задачами при станковом формовании железобетонных изделий, особенно из жестких смесей, является выбор эффективных режимов вибрационных воздействий и рациональных параметров виброплощадок, обеспечивающих высокую степень и однородность уплотняемых бетонных смесей.

К сожалению, при использовании стандартных режимов формования, существующие конструкции вибрационного оборудования не удовлетворяют современным требованиям в связи с их большим ресурсопотреблением и невысоким качеством изготавливаемых железобетонных изделий, малой эффективностью, низкой эксплуатационной надежностью, а также превышением допустимых норм по уровню шума и вибрации [4, 5].

Для уплотнения как жестких бетонных смесей так и формования крупноразмерных изделий проф. Б.В.Гусевым [6, 7] были разработаны теоретические основы ударно-вибрационной технологии уплотнения, разработано и внедрено оборудование для реализации низкочастотных режимов формования железобетонных изделий. В других работах [8, 9], в качестве эффективных режимов для уплотнения жестких бетонных смесей предложено использовать так называемые асимметричные безударные колебания, в значительной степени имитирующие ударно-вибрационный режим, и отличающихся от по-

следних отсутствием соударений колеблющегося вибростола с уравнивающей рамой.

В работах [10–12] на основе исследования взаимодействия бетонной смеси с рабочим органом вибростола предложено оптимизировать параметры ударно-вибрационных площадок, обеспечивающих эффективные режимы формования ЖБИ из жестких бетонных смесей.

Представляет интерес рассмотреть процесс распространения волнового пакета при ударно-вибрационном воздействии на форму с бетонной смесью и исследовать спектр импульсов, распространяющихся в бетонной смеси.

При взаимодействии формы с бетонной смесью, установленной на упругий элемент рабочего органа виброплощадки, форма и вибростол после соприкосновения продолжают двигаться навстречу друг другу. В случае опирания формы на вибростол без упругой прокладки, роль упругого элемента выполняет металл, из которого выполнен рабочий орган. При этом прокладка деформируется, зона их контакта увеличивается и возрастает сила отталкивания формы от рабочего органа. Под действием этой силы относительная скорость сближения формы и рабочего органа убывает до нуля, а затем силы упругости, вызванные их деформацией, возвращают форму и рабочий орган виброплощадки в исходное динамическое положение.

Рассматривая ударно-вибрационные воздействия, возникающие при встречном движении формы со смесью и рабочего органа вибро-

площадки, исследуем форму импульса, его спектр и длительность процесса соударения.

Известно [13], что величина деформации упругого элемента (прокладки или упругости материала вибростола) зависит от силы, ее сжимающей, и жесткости прокладки.

Длительность соударения можно определить по формуле:

$$\tau = \Delta T = 2,94 \cdot \sqrt[10]{\frac{1,22}{P_0 \cdot \delta \cdot c^4}} \cdot \sqrt{M}, \quad (1)$$

где P_0 – сжимающая сила, возникающая между формой и рабочим органом при их упругом контакте, Н; δ – максимальное удаление (размах колебаний) формы от рабочего органа вибромашины в процессе их взаимного движения, м; c – жесткость упругого элемента (контакта) между формой и вибростолом, Н·м⁻¹; M – приведенная масса системы "рабочий орган – форма со смесью", определяемая формулой:

$$M = \frac{M_1 \cdot M_2}{M_1 + M_2}, \quad (2)$$

где M_1 – масса рабочего органа – вибростола, кг; M_2 – масса формы с бетонной смесью, кг.

Из (1) следует, что τ мало зависит от величина зазора δ и силы P_0 . В основном эта величина определяется массой формы с бетонной смесью и рабочего органа и жесткостью промежуточного упругого элемента.

Сила, действующая в момент контакта формы с рабочим органом виброплощадки, нарастает по следующему закону [10]:

$$P_k(t) = 4,69 \sqrt{\frac{MP_0\delta}{\Delta T}} \sin \frac{\pi}{\Delta T} \cdot t, \quad (3)$$

где ΔT – момент максимального сближения вибростола и формы с бетоном:

$$P_k(t) = 0 \text{ при } t > \Delta T.$$

Сближение $y(t)$ формы с рабочим органом при их упругом контакте:

$$y(t) = \left(1,25 \frac{M}{c}\right)^{0,4} \cdot v_0^{0,8} \sin \frac{\pi}{\Delta T} t \quad (4)$$

при $0 < t \leq \Delta T$;

$$y(t) = 0 \text{ при } t > \Delta T.$$

Известно [14], что спектр некоторой почти периодической функции $y(t)$ определяется по формуле:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

Подставив (4) в (5) и проведя необходимые вычислительные операции, можно получить зависимость для вычисления амплитудно-частотного спектра:

$$S(\omega) = \frac{1,5(MP_0\delta)^{1/2} \cdot \cos \frac{\omega \cdot 2,94 \sqrt[10]{\frac{1,22}{P_0 \cdot \delta \cdot c^4}} \sqrt{M}}{2}}{\left[1 - \left(\frac{\omega \cdot 2,94 \sqrt[10]{\frac{1,22}{P_0 \cdot \delta \cdot c^4}} \sqrt{M}}{\pi}\right)^2\right]}, \quad (6)$$

где y – величина деформации элемента при упругом соударении формы с вибростолом, м; $\omega_i - i$ – ая гармоническая составляющая спектра, с⁻¹.

По формуле (6) были проведены расчеты спектрального распределения амплитуд колебаний формы при формовании бетонного изделия длиной 5 м, шириной 2 м и высотой 0,5 м из умеренно жесткой бетонной смеси [10]. Расчетная плотность бетонной смеси ρ 2400 кг/м³, размах рабочего органа – 1,5 мм, основная частота колебаний – 12,5 Гц. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, спектр волнового пакета при ударно-вибрационном воздействии на форму с бетонной смесью содержит большое число гармоник. Амплитуды гармоник, начиная со второй по отношению к несущей частоте воздействия изменяются по нелинейному закону в зависимости от параметров системы, основным из которых является жесткость упругого элемента (контакта) между формой с бетонной смесью и рабочим органом формующей машины.

При вибрационном формовании железобетонных изделий на ударно-вибрационных площадках в реальных заводских условиях из-за несовершенства крепления формы с бетонной смесью к рабочей поверхности виброплощадки, рассогласования дебалансов в секционных блочных виброплощадках и других производственных факторов, нередко возникает неравномерность распределения амплитуд и ускорений колебаний вибростола и ударам формы с уплотняемой бетонной смесью о раму стола. При этом форма с бетонной смесью в общем случае совершает перемещения в трех координатах X, Y, Z и повороты относительно тех же осей.

Исследования движения формы при ее свободной установке на рабочем органе вибромашины и изучение процессов распространения спектра упругих волн в бетонной смеси, выпол-

ненные в работе [10], показали, что спектральный состав частот, распространяющихся в бетонной смеси, априорно шире, чем при одноосных и периодических колебаниях формы, жестко крепящейся к виброплощадке с вертикально-направленными колебаниями. Многокомпо-

нентные колебания формы, реализуемые при ее свободной установке на вибростоле через упругий контакт, генерируют широкий и практически непрерывный спектр частот, передающийся в бетонную смесь.

Таблица 1

Результаты расчета спектра распределения амплитуд колебаний формы

№ гармоники	Частота рабочего органа		A_i , мм
	ω_i , с ⁻¹	f_i , Гц	
1	78,5	12,5	7,64
2	157	25	0,01
3	235,5	37,5	0,8
4	314	50	0,6
5	392	62,5	0,2
6	471	75	0,005
7	549,5	87,5	0,15
8	628	100	0,16
9	706,5	112,5	0,08
10	785	125	0,003
11	863,5	137,5	0,06
12	942	150	0,08
13	1020	162,5	0,04
14	1099	175	0,002
15	1177,5	187,5	0,03
16	1256	200	0,0005

Для определения параметров оптимальных воздействий со стороны рабочего органа формирующей машины на систему «форма–бетонная смесь», проанализируем формулу (6). После соответствующих преобразований ее можно представить в следующем виде:

$$S(\omega_i) = \frac{A_1 \cdot \cos \omega_i \cdot A_2}{(1 - A_3 \cdot \omega_i^2)}, \quad (7)$$

где

$$A_1 = 1,5 \cdot (c \cdot y^{3/2} \cdot \delta)^{1/2}, \quad (8)$$

$$A_2 = 2,94 \cdot 10^9 \sqrt{\frac{1,22}{\delta \cdot y^{1,5}}} \cdot \sqrt{\frac{M}{c}}, \quad (9)$$

$$A_3 = 2,94 \cdot 10^9 \sqrt{\frac{1,22}{\delta \cdot y^{1,5} \cdot c^5}} \cdot M. \quad (10)$$

Оценив вклад отдельных составляющих и проведя некоторые упрощения, выражение (6) можно записать в виде:

$$|S(\omega_i)| = A_1 \cdot |\cos \omega_i \cdot A_2|. \quad (11)$$

Очевидно, что амплитуды спектральных составляющих будут минимальны при значении $|\cos \omega_i A_2| = 1$, откуда

$$\omega_i \cdot A_2 = n \cdot \pi, \quad (12)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$

$$A_2 = \frac{n \cdot \pi}{\omega_i}. \quad (13)$$

При переходе от одной спектральной составляющей к другой (от $\omega_i - \omega_{i+1} = \omega_0$) амплитуды их будут максимальны при условии:

$$A_2 = \frac{\pi}{\omega_i}. \quad (14)$$

После преобразования выражения (9) A_2 можно представить в следующем виде:

$$A_2 = 3(\delta \cdot y^{3/2})^{-0,1} \cdot (\omega_0)^{-1}, \quad (15)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{M}}$ – частота собственных колебаний на упругом элементе.

Подставив выражение (15) в (14) получим:

$$\omega_i = \frac{\pi}{A_2} \cong \frac{\pi}{3} \omega_0 \cdot (\delta \cdot y^{3/2})^{0,1} = 1,04 \omega_0 (\delta \cdot y^{3/2})^{0,1}. \quad (16)$$

В табл. 2 приведены некоторые результаты расчетов значений ω_i при фиксированных значениях $\delta = 7 \cdot 10^{-3}$ м, $y = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м и различных величинах жесткости упругой прокладки c и приведенной массы M .

Из табл. 2. следует, что жесткость упругого контакта, установленного между формой с бетоном и вибростолом, существенно влияет на

спектр колебаний, передаваемый в бетонную смесь.

Таблица 2

Расчетные значения максимальных амплитуд спектральных составляющих

Жесткость упругой прокладки c , Н/м	Приведенная масса M , кг	Частота ω_r , Гц
$8 \cdot 10^7$	88,5	27,9
$6 \cdot 10^7$	76,7	24,5
$5 \cdot 10^7$	49,5	14,1
$4 \cdot 10^7$	36,1	11,6
$3 \cdot 10^7$	27,1	9,3
$2 \cdot 10^7$	19,8	5,2
$1 \cdot 10^7$	12,8	0,5

Для подтверждения теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования по изучению спектра волнового пакета в бетонной смеси с гарантированными качественными показателями и с применением метода голографической интерферометрии [10, 15, 16]. В экспериментах изменялась упругость контакта, амплитуда колебаний рабочего органа, соотношения масс формы с бетонной смесью и вибростолы, а также частота вибропривода, которая варьировалась в пределах 12,5...350 Гц. В качестве упругих элементов использовались материалы с жесткостью в диапазоне от $0,7 \cdot 10^7$ до $1,66 \cdot 10^{11}$ Н/м.

Программа исследований включала в себя определение частоты и амплитуды гармонических составляющих спектра волнового пакета, распространяющегося в бетонной смеси, эффективного ускорения частиц смеси, вычисляемого по формуле

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \omega_i^2, \quad (17)$$

где a и n – амплитуда и порядок взятой гармоники.

Некоторые результаты экспериментов представлены на рисунке.

Анализ результатов исследований показал, что амплитудно-частотный спектр колебаний, распространяющихся в бетонной смеси, изменяется по сложному закону. При больших жесткостях контакта между формой и рабочим органом формирующей машины распределение амплитуд гармоник просматривается четко. Из анализ выражения (7) видно, что при больших жесткостях c , высокочастотные гармоники, определяемые $\text{Cos}\omega_i$, изменяются мало.

При упругом контакте формы с вибростолом через резиновую прокладку с меньшей жесткостью, спектры импульса при соударении имеют более сложное распределение, близкое к закону $(\text{Cos}X)/X$. При этом имеет место практическое исчезновение одних гармонических составляющих с возрастанием амплитуды других. Тем самым возникают возможности управлять

спектром путем замены одной упругой прокладки на другую или использовать элементы с регулируемой жесткостью [10, 17].

Таким образом, при использовании упругих прокладок с нелинейными характеристиками в системе "рабочий орган – упругий элемент – форма с бетонной смесью" создаются предпосылки для расширения спектра частот, генерируемых в смесь в очень широких пределах. С энергетической точки зрения, при воздействии на формируемую смесь спектра импульсов, содержащих большое количество составляющих, несущих энергию выше пороговой, процессы виброуплотнения бетонной смеси будут протекать более интенсивно.

Как показано в работах [3, 10], для оценки спектра волнового пакета, распространяющегося в бетонной смеси с успехом можно использовать такой параметр, характеризующий эффективность уплотнения бетонных смесей, как ускорение.

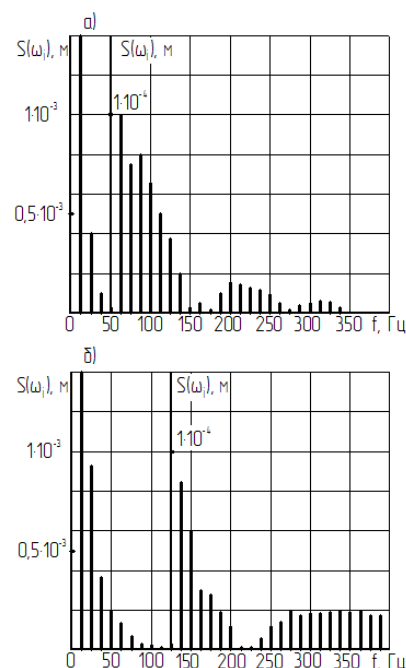


Рис.1. Спектры импульсов в бетонной смеси при соударении формы с вибростолом через резиновые прокладки различной жесткости c : а) $c = 3,53 \cdot 10^7$ Н/м; б) $c = 2,08 \cdot 10^7$ Н/м

Представленные теоретические и экспериментальные исследования хорошо согласуются с результатами работ по созданию виброплощадок с управляемыми упругими элементами, позволяющими в широких пределах изменять параметры колебательного режима (амплитуду, ускорение колебаний и частоту вибраций) [10, 17] и виброплощадок со свободно устанавливаемой на вибростолу формой [18, 19].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев Б.В., Зазимко В.Г. Вибрационная технология бетона. Киев: Будивельник, 1991. 158 С.
2. Савинов О.А., Лавринович Е.В. Вибрационная техника уплотнения и формирования бетонных смесей. Л.: Стройиздат, 1986. 278 С.
3. Пособие по технологии формирования железобетонных изделий (к СНиП 3.09.01-85) / Гусев Б.В., Аксельрод Е.З., Звездов А.И., и др. М.: Стройиздат, 1988. 111 С.
4. Олехнович К.А., Зазимко В.Г. Основные тенденции развития станкового уплотнения бетонных смесей // Новое в технологии сборного железобетона. М.: Знание, 1985. С. 90–96.
5. Волков Л.А., Генкин С.А., Лепеев В.Ф. Универсальные виброударные площадки с многокомпонентными колебаниями // Строительные материалы. 1996, №5. С. 6–7.
6. Гусев Б.В., Деминов А.Д., Крюков Б.И. и др. Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных смесей. М.: Стройиздат, 1982. 152 С.
7. Гусев Б.В. Теория и практика уплотнения бетонных смесей при низкочастотных режимах вибрации: Автореф. дис. докт. техн. наук. М., 1977. 25 С.
8. Васильев В.Г., Анатооллы Ф.Н., Ракишев Т.А. Эффективные режимы для создания оборудования по уплотнению бетонных смесей: Тез. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы формирования при изготовлении изделий сборного железобетона». Челябинск, УСДЭНТП, 1991. С. 18–20.
9. Васильев В.Г., Зиновьев Е.Г. Разработка и исследование асимметричной безударной виброплощадки. Моск. ин-т коммун. хоз-ва и стр-ва. М., 1999. 15 С. - Деп. ВИНТИ, № 744-В99.
10. Зиновьев Е.Г. Формование крупноразмерных железобетонных изделий с применением управляемых режимов виброуплотнения: дис...канд. техн. наук. М., 1989. 257 С.
11. Васильев В.Г. Выбор оптимальных параметров ударно-вибрационных площадок // Механизация строительства. 2015. № 11. С.30–33.
12. Богданов В.С., Шарапов Р.Р., Фадин Ю.М., Семикопенко И.А., Несмеянов Н.П., Герасименко В.Б. Основы расчета машин и оборудования предприятий строительных материалов и изделий: учебник. Старый Оскол: 2012.
13. Карамзин В.Е. Некоторые особенности поведения бетонной смеси при станковом вибрировании // Технология вибрирования железобетонных изделий. М: Стройиздат, 1970. С.67–84.
14. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962. 236 С.
15. Зиновьев Е.Г. Разработка методики исследований системы "машина – среда" при реализации различных колебаний / Зиновьев Е.Г., Васильев В.Г., Парфенов Е.П. Моск. ин-т коммун. хоз-ва и строит. М., 1999. 12 С. - Деп. ВИНТИ, № 745-В99.
16. Шарапов Р.Р., Шаптала В.Г., Алфимова Н.И. Прогнозирование дисперсных характеристик высокодисперсных цементов // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 24–25.
17. Зиновьев Е.Г., Васильев В.Г., Серов А.В. Виброплощадка с регулируемыми параметрами. Моск. ин-т коммун. хоз-ва и стр-ва. М., 2001. 10 С. Деп. ВИНТИ, № 399-В2001.
18. Пат. 2002615 Российская Федерация, МПК7 В 28 В 1/08. Виброударная площадка для уплотнения бетонной смеси в форме / С.А. Генкин, В.Ф. Лепеев, Е.В. Пархаев; заявитель Всесоюзное научно-производственное объединение "Энерготехпром", патентообладатель Генкин С.А. - № 5040009/33, заявл. 28.12.93; опублик. 15.11.1993, Бюл. № 41.
19. Пат. 2252137 Российская Федерация, МПК7 В 28 В 1/087. Виброплощадка / А.В. Овчинников, В.Н. Барышников, Л.А. Волков, А.Г. Пыжиков; заявители и патентообладатели Овчинников А.В., Барышников В.Н., Волков Л.А., Пыжиков А.Г. - № 2004126119/03, заявл. 30.08.2004; опублик. 20.05.2005.

Telichenko V.I., Vasiliev V.G.

THE INVESTIGATION OF THE SPECTRUM OF PULSES IN CONCRETE UNDER SHOCK AND VIBRATION MOLDING

Improving the efficiency of vibroforming of concrete products is inextricably linked to the choice of rational modes of vibration effects on the sealing compound and the optimal parameters up tapping equipment. The article discusses the propagation of a wave packet under shock vibration exposure to the mold with the concrete mixture and investigated the spectrum of pulses propagating in the concrete mix. Studies have shown

that the spectrum of a wave packet under shock vibration exposure to the mold with the concrete mixture contains a large number of harmonics, the amplitude of which changes according to the nonlinear law, depending on the system parameters, the main of which is the stiffness of the elastic element between the form with concrete mix and work on the bending machine. Thus, by changing the stiffness of the elastic strips can widely change the amplitude-frequency spectrum of oscillations propagating in the concrete mix and thereby adjust the intensity of the process of vibroforming. The results of theoretical and experimental studies agree well with the works on creation of vibratory plates with adjustable parameters and vibratory plates with a freely mounted on a vibrating table form.

Key words: *vibration molding, concrete mix, variations.*

Теличенко Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, президент.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

Адрес: Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

E-mail: PRESIDENT@mgsu.ru

Васильев Виталий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация строительства»

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

Адрес: Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

E-mail: vasilievvg@yandex.ru