

УДК 693.95(075.8)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ЗАСЛОНКИ БЕТОНОСМЕСИТЕЛЯ С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДОЙ

Ю. С. Саленко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, м. Кременчуг, Украина. E-mail: kmtto@mail.ru

Предложена математическая модель, описывающая поведение динамической системы «Вибрационная заслонка – бетонная смесь», в которой бетонная смесь представлена в виде системы с распределенными параметрами. Составлено волновое уравнение движения уплотняемой среды. Определены граничные условия. Найдены значения волнового числа, коэффициента затухания возмущения в обрабатываемой среде, приведенная масса и коэффициент неупругого сопротивления бетонной смеси. Определен закон распространения волн возмущения в обрабатываемой среде. Приведены результаты экспериментальных исследований. Установлено, что при вибрации происходит снижение внутреннего коэффициента трения бетонной смеси в 2,8...4,6 раза, а коэффициента трения бетонной смеси о поверхность корпуса смесителя в два раза.

Ключевые слова: смеситель, вибрационная заслонка, бетонные смеси.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ЗАСЛОНКИ БЕТОНОЗМІШУВАЧА З ОБРОБЛЮВАНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Ю. С. Саленко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: kmtto@mail.ru

Запропоновано математичну модель, що описує поведінку динамічної системи «Вібраційна заслінка – бетонна суміш», в якій бетонна суміш представлена у вигляді системи з розподіленими параметрами. Складено хвильове рівняння руху ущільнюваного середовища. Визначено граничні умови. Знайдені значення хвильового числа, коефіцієнта загасання обурення в оброблюваному середовищі, приведена маса і коефіцієнт непружного опору бетонної суміші. Визначено закон поширення хвиль обурення в оброблюваному середовищі. Наведено результати експериментальних досліджень. Встановлено, що при вібрації відбувається зниження внутрішнього коефіцієнта тертя бетонної суміші в 2,8...4,6 рази, а коефіцієнта тертя бетонної суміші об поверхню корпусу змішувача в два рази.

Ключові слова: змішувач, вібраційна заслінка, бетонні суміші.

АКТУАЛЬНОСТЬ РОБОТЫ. Одновальные бетоносмесители принудительного действия [1] предназначены для приготовления пластичных и жестких цементобетонных смесей, бетонов с легким заполнителем и строительных растворов. Эти смесители сочетают в себе высокую эффективность приготовления бетонных смесей с простотой конструктивного исполнения. Имеют сравнительно небольшую металлоемкость. Разработанные одновальные бетоносмесители принудительного действия [1] имеют на 30–40 % меньшую энергоемкость, чем двухвальные бетоносмесители принудительного действия. Однако современное производство требует создания машин и бетоносмесительного оборудования с малой энергоемкостью, обеспечивающих эффективное приготовление жестких и сверхжестких бетонных смесей. Снижения энергоемкости и повышения эффективности процесса приготовления можно достичь путем использования технологии, при использовании которой наряду с механическим перемешиванием на бетонную смесь одновременно оказывается вибрационное воздействие со стороны вмонтированной в корпус смесителя вибрационной заслонки. При этом уменьшаются силы сопротивления перемешиванию за счет уменьшения внутреннего коэффициента трения смеси и коэффициента трения смеси об обечайку корпуса смесителя. Одновременно ускоряется процесс приготовления смеси и улучшается её качество за счет виброактивации.

Таким образом, создание смесителей принудительного действия для приготовления бетонных смесей, сочетающих в себе высокие показатели производительности и качества приготавливаемой смеси с его простотой конструкции и сравнительно малыми значениями металлоемкости и энергоемкости, является важной народнохозяйственной задачей.

Цель работы – исследование взаимодействия вибрационной заслонки бетоносмесителя с перемешиваемой смесью в процессе её приготовления.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для определения характера взаимодействия вибрационной заслонки с перемешиваемой бетонной смесью исследуем динамическую систему «вибрационная заслонка - обрабатываемая среда» (рис. 1). Здесь обрабатываемая в процессе перемешивания бетонная среда 1 представлена в виде системы с распределенными параметрами. Вибрационная заслонка 2 (рис. 1) вмонтирована в корпус 3 бетоносмесителя и связана с ним при помощи упругих амортизаторов 4, выполненных в виде герметичных прокладок. Между вибрационной заслонкой 2 и корпусом 3 выполнен технологический зазор. Для определения характера взаимодействия вибрационной заслонки с бетонной смесью изучим поведение динамической системы при действии на вибрационную заслонку в направлении координатной оси Y гармонической силы $Q \sin \omega t$.

Вследствие того, что перемешиваемая бетонная смесь представляет собой массу, в большей степени обладающую вязкими свойствами, и на возбуждаемый участок (рис. 1) будут действовать дополнительные силы, вызываемые внутренним трением виброактивного слоя смеси о неактивные слои, то закон движения обрабатываемой смеси в направлении координатной оси Y за время t может быть представлен следующим дифференциальным уравнением:

$$\eta \frac{\partial^3 u(y,t)}{\partial y^2 \partial t} = \rho \frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial t^2} + \xi_s \frac{\partial u(y,t)}{\partial t}, \quad (1)$$

где u и y – эйлерова и лагранжева координаты по координатной оси Y ; η – динамический коэффициент неупругого сопротивления обрабатываемой бетонной смеси; ρ – плотность бетонной смеси; t – время; ξ_s – эквивалентный коэффициент сопротивления, учитывающий боковое трение виброактивного слоя смеси (выделенная область на рис. 1) с нижележащим неактивным слоем.

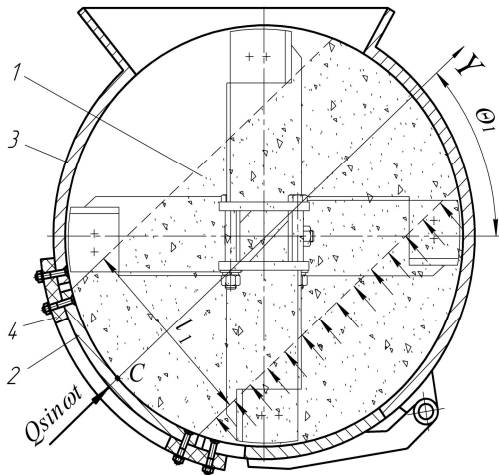


Рисунок 1 – Расчетная схема динамической системы «Вибрационная заслонка – обрабатываемая среда»

В общем виде решение волнового уравнения колебаний (1) можно представить в виде мнимой части комплексной функции [2]:

$$u(y,t) = U(y) e^{i\omega t}, \quad (2)$$

где $U(y)$ – комплексная функция, удовлетворяющая граничным условиям; ω – угловая частота вынужденных колебаний.

Подставляя выражение (2) в уравнение (1), получим уравнение для комплексной функции $U(y)$ в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 U(y)}{\partial y^2} + \frac{\rho\omega^2 - i\xi_s\omega}{i\eta\omega} U(y) = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) можно представить в виде [2]:

$$U(y) = Me^{i\tilde{k}y} + Ne^{-i\tilde{k}y}, \quad (4)$$

где M и N – комплексные амплитуды, определяемые из граничных условий, \tilde{k} – волновое число,

$$\tilde{k} = \sqrt{\frac{\rho\omega^2 - i\xi_s\omega}{i\eta\omega}}. \quad (5)$$

Комплексное волновое число \tilde{k} можно представить в виде следующей комплексной функции [2]:

$$\tilde{k} = k - i\alpha, \quad (6)$$

где k – волновое число; α – коэффициент затухания возмущения.

Приравнявая выражения (4) и (5) и возводя левую и правую части в квадрат, получим следующее выражение:

$$i\eta\omega k^2 + 2k\alpha\eta\omega - i\eta\omega\alpha^2 = -i\xi_s\omega + \rho\omega^2. \quad (7)$$

Из равенства отдельно вещественной и мнимой частей выражения (7), найдем значения волнового числа k и коэффициента затухания возмущения α в следующем виде:

$$k = \sqrt{\frac{-\xi_s + \sqrt{\xi_s^2 + \rho^2\omega^2}}{2\eta}}; \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\rho\omega}{\sqrt{2\eta(-\xi_s + \sqrt{\xi_s^2 + \rho^2\omega^2})}}. \quad (9)$$

На основании зависимостей (5) и (6), найденных значений k (8) и α (9), выражение (2) для волны, распространяющейся в положительном направлении, может быть представлено в следующем виде:

$$u(y,t) = e^{-\alpha y} (M \sin ky + N \cos ky) e^{i\omega t}. \quad (10)$$

Для определения постоянных интегрирования M и N используем следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} -m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_3 u(0,t) - \lambda^2 \rho F_1 \frac{\partial u(0,t)}{\partial y} + \\ + \eta F_1 \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial y \partial t} - \xi_s F_2 \frac{\partial u(0,t)}{\partial t} = \\ = -Q \sin(\omega t); \end{aligned} \quad (11)$$

$$u(H_r, t) = 0, \quad (12)$$

где m – масса вибрационной заслонки; c_3 – коэффициент жесткости упругих амортизаторов в направлении координатной оси Y ; Q – амплитуда возмущающей силы; F_1 – площадь взаимодействия вибрационной заслонки с бетонной смесью в направлении, перпендикулярном координатной оси Y ,

$F_1 = l_1 L$; l_1 – высота обрабатываемого слоя (рис. 1), равная проекции вибрационной заслонки на плоскость, перпендикулярную координатной оси Y ; L – длина вибрационной заслонки; H_r – расчетная толщина обрабатываемого слоя в направлении координатной оси Y ; λ – фазовая скорость распространения возмущения в обрабатываемой среде; F_2 – расчетная площадь взаимодействия вибрационной заслонки с бетонной смесью нижним торцом, $F_2 = Ld$; d – средний диаметр минеральных частиц обрабатываемого слоя бетонной смеси.

Третий член выражения (11) отражает квазиупругие свойства обрабатываемой смеси, возникающие при вибрационном воздействии.

Подставляя полученную зависимость (10) в граничное условие (12), найдем соотношение между постоянными интегрирования M и N :

$$M = -N \frac{\cos kH_r}{\sin kH_r}. \quad (13)$$

На основании выражения (13) преобразуем зависимость (10) к следующему виду:

$$u(y, t) = Ne^{-\alpha y} \frac{\sin k(H_r - y)}{\sin kH_r} e^{i\omega t}. \quad (14)$$

Для определения постоянной интегрирования N подставим выражение (14) в граничное условие (11).

Получим

$$N = Q \{ [c_3 - m\omega^2 - \lambda^2 \rho F_1 (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r)] - i\omega [F_1 \eta (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r) + F] \} / \{ [c_3 - m\omega^2 - \lambda^2 \rho F_1 (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r)]^2 + \omega^2 [F_1 \eta (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r) + F_2 \xi_s] \}. \quad (15)$$

С учетом выражения (15) решение волнового уравнения колебаний (1) приведем к следующему виду:

$$u(y, t) = Q \{ [c_3 - m\omega^2 - \lambda^2 \rho F_1 (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r)] - i\omega [F_1 \eta (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r) + F] \} / \{ [c_3 - m\omega^2 - \lambda^2 \rho F_1 (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r)]^2 + \omega^2 [F_1 \eta (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r) + F_2 \xi_s] \} \times e^{-\alpha y} \frac{\sin k(H_r - y)}{\sin kH_r} e^{i\omega t}. \quad (16)$$

Анализируя числитель и знаменатель выражения (16), приходим к выводу, что цементобетонная смесь, взаимодействующая с вибрационной заслонкой, проявляет инерционные и неупругие свойства, характеристиками которых является приведенная

масса m_b и коэффициент неупругого сопротивления μ_b , т.е.

$$m_b = \frac{\lambda^2 \rho F_1 (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r)}{\omega^2}; \quad (17)$$

$$\mu_b = F_1 \eta (\alpha + k \operatorname{ctg} k H_r) + F_2 \xi_s. \quad (18)$$

Используя зависимости (15) и (16), преобразуем выражение (14) к следующему виду:

$$u(y, t) = \frac{Q \{ [c_3 - (m + m_b) \omega^2] - i\omega \mu_b \}}{[c_3 - (m + m_b) \omega^2]^2 + \omega^2 \mu_b^2} \times e^{-\alpha y} \frac{\sin k(H_r - y)}{\sin kH_r} (\cos \omega t + i \sin \omega t). \quad (19)$$

Выделяя из уравнения (19) мнимую часть, получим искомое решение уравнения (1), удовлетворяющего граничным условиям (11) и (12):

$$u(y, t) = A e^{-\alpha y} \frac{\sin k(H_r - y)}{\sin kH_r} \sin(\omega t - \psi), \quad (20)$$

где A – амплитуда колебаний вибрационной заслонки,

$$A = \frac{Q}{\sqrt{[c_3 - (m + m_b) \omega^2]^2 + \omega^2 \mu_b^2}}; \quad (21)$$

ψ – угол сдвига фаз между амплитудой возмущающей силы и амплитудой перемещением вибрационной заслонки,

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{\mu_b \omega}{c_3 - (m + m_b) \omega^2}. \quad (22)$$

Эквивалентный коэффициент сопротивления ξ_s , учитывающий боковое трение виброактивного слоя смеси (выделенная область на рис. 1) с нижележащим неактивным слоем, может быть с достаточной степенью точности определен по методу линеаризации сил кулонового трения [3]:

$$\xi_s = \frac{4 \rho g l_1 f_{v2} \cos \theta}{\pi A_0 \omega}, \quad (23)$$

где f_{v2} – коэффициент внутреннего трения бетонной смеси при наложении вибрационного воздействия; A_0 – эквивалентная амплитуда колебаний, $A_0 = 0,05$ см при угловой частоте колебаний $\omega = 293$ рад/с; θ – угол наклона координатной оси Y .

Фазовая скорость распространения возмущения в обрабатываемой среде может быть в первом приближении определена из следующей зависимости:

$$\lambda = \frac{1}{2(1 + \mu)} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (24)$$

где E – динамический модуль упругой деформации бетонной смеси; μ – коэффициент Пуассона.

Динамический коэффициент неупругого сопротивления обрабатываемой бетонной смеси может быть определен из следующей зависимости:

$$\eta = f_{v2} H_r \sqrt{E\rho} . \quad (25)$$

Расчетную толщину обрабатываемого слоя в направлении координатной оси Y можно определить из следующей зависимости [2]:

$$H_r = \frac{\pi}{2\omega} \sqrt{\frac{E}{\rho}} . \quad (26)$$

Полученная зависимость (20) описывает волновой характер колебаний обрабатываемой смеси в зависимости от амплитуды и частоты возмущающей силы, геометрических размеров вибрационной заслонки и корпуса смесителя, физико-механических обрабатываемой смеси. При $y = 0$ эта зависимость описывает колебания вибрационной заслонки.

Таким образом, полученные теоретические зависимости позволяют установить кинематические и силовые функциональные зависимости, описываю-

щие взаимодействие вибрационного рабочего органа с перемешиваемой бетонной смесью как в системах с распределенными параметрами, так и в дискретных динамических моделях.

Коэффициенты внутреннего трения бетонной смеси и трения бетонной смеси о стенки корпуса смесителя существенно зависят не только от её консистенции, но и от вида и интенсивности вибрационного воздействия.

В табл. 1 приведены экспериментальные значения коэффициентов трения бетонных смеси о стенки корпуса смесителя f_1 и коэффициентов внутреннего трения бетонных смесей f_2 различной консистенции смеси, полученные на экспериментальной установке без действия вибрации, а также значения этих же коэффициентов f_{v1} и f_{v2} при вибрационном воздействии. Вибрационное воздействие сообщалось бетонной смеси заслонкой, колеблющейся под нагрузкой с угловой частотой $\omega = 291$ рад/с и амплитудой 0,4...0,45 мм. Экспериментальные данные получены при скорости перемещения лопатки 3,8 м/мин.

Таблица 1 – Изменения коэффициентов трения бетонной смеси по металлической поверхности и коэффициентов внутреннего трения бетонной смеси различной консистенции при её вибрации с угловой частотой 291 рад/с и амплитудой 0,4...0,45 мм

Жесткость смеси, с	Показания значений параметров без вибрации			Показания значений параметров при вибрационном воздействии		
	Плотность смеси, кг/м ³	Коэффициенты трения		Плотность смеси, кг/м ³	Коэффициенты трения	
		f_1	f_2		f_{v1}	f_{v2}
Ж=30	1900	0,45	0,7	2290	0,22	0,15
Ж=60	1850	0,5	0,7	2230	0,25	0,22
Ж=90	1800	0,55	0,75	2170	0,28	0,25
Сухая смесь	1600	0,7	0,8	2130	0,35	0,28

Анализ экспериментальных данных показывает, что в результате вибрационного воздействия с угловой частотой $\omega = 291$ рад/с и амплитудой 0,4...0,45 мм и скорости перемещения лопатки 3,8 м/мин коэффициенты трения бетонной смеси о металлическую поверхность уменьшаются примерно в два раза, коэффициенты внутреннего трения уменьшаются в 2,8...4,6 раза в зависимости от консистенции бетонной смеси, причем наибольшее уменьшение коэффициента внутреннего трения наблюдается при меньшей жесткости бетонной смеси, т.е. при большем водосодержании смеси. Это объясняется тем, что при большем водосодержании смеси переходят в тиксотропное состояние, при котором резко уменьшается внутреннее трение в смеси за счет выделения в межзерновое пространство большего количества воды, которая в совокупности с вяжущим играет роль смазки. Одновременно при вибрационном воздействии возрастает подвижность минеральных частиц, их переориентация и, как следствие, в результате действия этих факторов уменьшается сопротивление при смещении контактирующих слоев бетонной смеси рабочим органом. При вибрационном воздействии бетонная смесь уплотняется. В

табл. 5.7 приведены значения коэффициентов трения при соответствующих значениях плотности (колонка 3), образуемой при перемешивании в смесителе неактивированной бетонной смеси. Там же в колонке 5 приведены значения плотностей, которые образуются при перемешивании активированной бетонной смеси.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные и теоретические значения, вычисленные по формуле (21) амплитуды колебаний вибрационной заслонки массой $m = 6,5$ кг при амплитуде возмущающей силы $Q = 0,5$ кН, угловой частоте колебаний $\omega = 291$ рад/с, жесткости упругих амортизаторов 120 кН/м в зависимости от физико-механических и динамических характеристик виброактивированной бетонной смеси различной консистенции. Анализ приведенных данных показывает, что полученные теоретические выражения достаточно точно отвечают требованиям описания реальных колебаний вибрационной заслонки. Расхождение теоретических и экспериментальных данных составляет 5...12 %. Большие расхождения из приведенного диапазона жесткостей бетонных смесей наблюдаются при большей жесткости бетонной смеси.

Таблиця – 2. Теоретические и экспериментальные значения амплитуды колебаний вибрационной заслонки в зависимости от амплитуды возмущающей силы и физико-механических характеристик бетонной смеси

Жесткость смеси, с	Физико-механические характеристики бетонной смеси			Параметры вибрационного воздействия		
	Плотность смеси ρ , кг/м ³	Динамический модуль упругой деформации E , мПа	Расчетная толщина обрабатываемого слоя H_r , см	Амплитуда возмущающей силы Q , кН	Амплитуда колебаний заслонки A , см	
					Теоретическое значение	Экспериментальное знач.
Ж=30	2290	12,1	39,6	0,5	0,0421	0,04
Ж=60	2230	8,42	33,5	0,5	0,0384	0,042
Ж=90	2170	6,0	28,6	0,5	0,0402	0,045
Сухая смесь	2130	4,76	25,8	0,5	0,0395	0,045

ВЫВОДЫ. Таким образом, было установлено, что использование вибрационной заслонки в однофазном бетоносмесителе принудительного действия позволяет значительно уменьшить силы сопротивления при перемешивании бетонной смеси, причем виброактивация бетонной смеси позволяет не только ускорить её приготовления за счет более интенсивного перемешивания минеральных составляющих, но и улучшить качество приготовленной смеси за счет предельного разрушения дефектных агрегатов смеси, состоящих из частиц цемента покрытых водной пленкой и капелек воды, удерживающих на своей поверхности частицы цемента силами капиллярного сцепления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саленко Ю.С. Разработка одновальных бетоносмесителей принудительного действия // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. Вип. 5/2009 (58), част. 1. – Кременчук: КДПУ, 2009. – С. 79–83.
2. Маслова Н.А. Исследование взаимодействия вибрационного рабочего органа с уплотняемой средой // Проблемы создания новых машин и технологий / Научн. труды Кременчугского гос. политехн. института. – Кременчуг, 1997. – Вып. 2, част. 3. – С. 32–34.
3. Прочность, устойчивость, колебания. – Справочник. Т.3 / Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 568 с.

INVESTIGATION OF INTERACTION BETWEEN THE CONCRETE MIXER VIBRATION DAMPER AND PROCESSABLE MEDIUM

Yu. Salenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kmto@mail.ru

The author has suggested a new mathematical model describing the behavior of the «Vibration damper - concrete mixture» dynamic system, where the concrete is represented as a system with distributed parameters. Within the frame of research the wave equation of the compactible medium motion was compiled and the boundary conditions were defined. As a result, it were calculated such key parameters as values of the wave number, the perturbation attenuation coefficient in the processable medium, reduced mass, and the coefficient of inelastic resistance of a concrete mixture and the law of propagation of perturbations in the processable medium was defined, also, the results of experimental research were presented. It is found that when a vibration occurs, the internal friction coefficient of a concrete mix reduces by 2.8...4.6 times and the friction coefficient between a concrete mixture and the surface of a mixer body is half the value.

Ключевые слова: mixer, vibration damper, concrete mixtures.

REFERENCES

1. Salenko, Yu. «Development of compulsory one-shaft mixers» (2009), *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University*, iss. 5(59), part 1, pp. 79–83.
2. Maslova, N.A. (1997), «Investigation of the interaction of vibration of the working body with the compactible medium», *Problems of creation of new machines and technologies*, Kremenchuk State Polytechnic Inst., iss.2, part 3, pp. 32–44, Kremenchuk, Ukraine,
3. Birger, I.A., Panovko, Ya.G. (1968), *Prochnost, ustoichivost, kolebaniya* [Strength, stability, and vibrations], Reference book, vol. 3, Mashinostroenie. Moscow, Russia.

Стаття надійшла 11.05.2013.