

УДК 693.95(075.8)

Саленко Ю.С.<sup>1</sup>

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОВАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО БЕТОНОСМЕСИТЕЛЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

*АННОТАЦИЯ. Описана конструкция и принцип действия одновального вибрационного бетоносмесителя принудительного действия. Смеситель состоит из корпуса, внутри которого расположен лопастной вал с периферийными и центральными лопатками. В стенке корпуса вмонтирована вибрационная заслонка, которая оказывает вибрационное воздействие на перемешиваемую смесь. Определены основные параметры и закономерность движения вибрационной заслонки. Определено напряженно-деформированное состояние перемешиваемой бетонной смеси.*

*Ключевые слова: бетоносмеситель, лопастной вал, заслонка, вибрация*

*АННОТАЦІЯ. Описано конструкцію і принцип дії одновального вібраційного бетонозмішувача примусового дії. Змішувач складається з корпусу, усередині якого розташовано лопатевий вал з периферійними і центральними лопатками. У стінці корпусу вмонтовано вібраційна заслінка, яка надає вібраційне вплив суміші, що перемішується. Визначено основні параметри та закономірність руху вібраційної заслінки. Визначено напружено-деформований стан бетонної суміші, що перемішується.*

*Ключові слова: бетонозмішувач, лопатевий вал, заслінка, вібрація.*

*SUMMARY. The author describes the construction and principle of operation vibration concrete mixer of forced action with some of the shaft. The mixer consists of a body, inside of which is located blade shaft with peripheral and Central shoulder blades. In the wall of the chassis is mounted vibration damper, which provides vibration impacts on the concrete mix. Determination of the main parameters and regularity of motion of the vibration damper. Defined stress-strain state of mixed concrete mixture.*

*Keywords: concrete mixer, blade shaft, dampers, vibration.*

**Введение.** Одновальные бетоносмесители принудительного действия [1...2], предназначены для приготовления пластичных и жестких цементобетонных смесей, бетонов с легким заполнителем и строительных растворов. Эти смесители сочетает в себе высокую эффективность приготовления бетонных смесей с простотой конструктивного исполнения. Имеют сравнительно небольшую металлоемкость. Энергоемкость разработанных одновальных бетоносмесителей принудительного действия [1...2] отвечает требованиям ГОСТ 16349-85 [3] и находится ниже уровня энергоемкости двухвальных бетоносмесителей принудительного действия на 30 – 40%. 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 вибрационных бетоносмесителей принудительного действия [4].

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящих исследований является определение основных параметров вибрационного бетоносмесителя, использующего в процессе приготовления бетонной смеси механическое перемешивание с одновременным вибрационным воздействием.

**Изложение основного материала.** На рис. 1 представлен предлагаемый одновальный вибрационный лопастной бетоносмеситель [4], который включает корпус 1 с загрузочным 2 и выгрузочным, закрытым заслонкой 3, отверстиями и центральный лопастной

вал 4, смонтированный в подшипниковых опорах 5, вынесенных за пределы области перемешивания. В стенке цилиндрического корпуса 1 со стороны вхождения лопаток в цементобетонную смесь дополнительно проделан продольный проем, в котором при помощи упругих амортизаторов 6 (прокладок) смонтирована вибрационная заслонка 7, снабженная вибровозбудителем круговых колебаний 8.

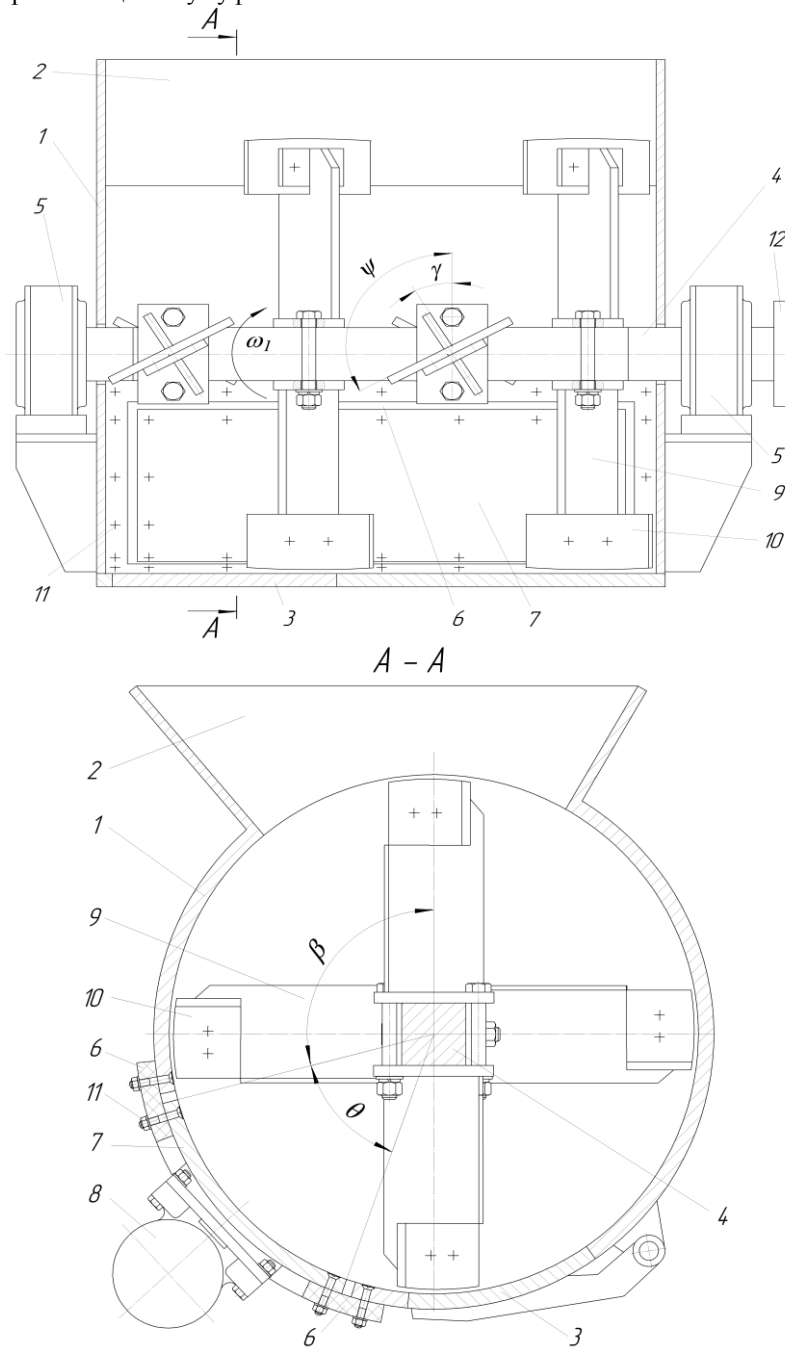
При этом внутренняя поверхность вибрационной заслонки выполнена в виде цилиндрической поверхности с центральным углом  $\theta = 55 \dots 90^\circ$  и радиусом, равном радиусу внутренней поверхности корпуса смесителя  $R$ , и имеет длину в продольном направлении равную  $0,8 \dots 0,95$  длины внутренней поверхности корпуса смесителя, причем вибрационная заслонка расположена так, что центральный угол между вертикальной прямой, проходящей через ось вращения лопастного вала, и лучом, связывающим верхнюю кромку вибрационной заслонки с осью вращения лопастного вала, равен  $\beta = 75 \dots 105^\circ$ . На лопастном валу 4 смонтированы центральные 9 и периферийные 10 лопатки. При этом рабочие поверхности периферийных лопаток 10 наклонены под углом  $\psi = 120 \dots 130^\circ$  к плоскости, перпендикулярной оси вала, а центральные лопатки наклонены под углом  $\gamma = 30 \dots 40^\circ$  к плоскости, перпендикулярной оси вала. При этом периферийные лопатки 10 образуют прерывистую винтовую линию в прямом направлении для транспортирования смеси в зону выгрузки, а центральные лопатки образуют прерывистую линию в обратном направлении. Для закрепления упругих прокладок 6 на кор-

<sup>1</sup> Саленко Ю.С., канд. техн. наук, доцент.

пусе 1 и вибрационной заслонке 7 используются резьбовые соединения 11.

Лопастной вал 4 смесителя связан с приводом (на рисунке не показан) при помощи полумуфты 12.

Одновальный лопастной вибрационный бетономеситель работает следующим образом.



*Рис. 1. Общий вид одновального вибрационного бетономесителя принудительного действия.*

После включения привода через загрузочное отверстие 2 во внутрь корпуса 1 подаются предварительно отдозированные минеральные материалы и воду. При вращении вала по стрелке, указанной на рис. 1, лопасти интенсивно перемешивают смесь, одновременно перемещая ее по двум противоположно направленным потокам: в центральной части и по периферии. Под действием центральных лопаток 9 смесь переводится во взвешенное состояние и образуется центральный поток, который перемещается в продольном

направлении к задней торцевой стенке корпуса, и одновременно закручивается вокруг продольной оси. Под действием периферийных лопаток 10 образуется кольцевой периферийный поток, который вращается вокруг продольной оси и одновременно перемещается в продольном направлении к передней торцевой стенке корпуса. При этом каждая частица испытывает вихревые движения и периодически перемещается из одного потока в другой, обеспечивая тем самым интенсивный массообмен. Одновременно под действием

вибрационного воздействия со стороны вибрирующей заслонки 7 смесь переходит в тиксотропное состояние и, в результате этого, значительно сокращаются силы сопротивления, действующие на лопасть на вал 4 со стороны цементобетонной смеси. При этом также интенсивно разрушаются агрегаты, состоящие: а) из слипшихся частиц цемента, покрытых водной пленкой; б) из капелек воды, на поверхности которых силами поверхностного натяжения удерживаются частицы цемента. Смесь становится более подвижной, ускоряется процесс обволакивания минеральных частиц вяжущим. В результате сокращается продолжительность перемешивания и образуется однородная качественная смесь.

Таким образом, в результате снижения сил сопротивления на лопасти, возникающих при перемешивании смеси, и сокращения продолжительности перемешивания, уменьшается мощность привода и достигается эффект снижения энергоемкости. Приведенный диапазон соотношения основных параметров предлагаемого однолопастного вибрационного бетоносмесителя является рациональным.

При открывании заслонки 3 смесь выгружается в транспортное средство.

На эффективность вибрационной обработки в процессе перемешивания цементобетонных смесей и снижение сил сопротивления перемешиванию суще-

ственно влияет характер движения вибрационной заслонки, который зависит от массы, момента инерции и центра тяжести масс колеблющихся тел, а также от жесткости упругих амортизаторов, частоты и амплитуды возмущающих сил вибровозбудителя колебаний, геометрических размеров вибрационной заслонки и физико-механической характеристики смеси. Поскольку частота и амплитуда вынужденных колебаний вибрационной заслонки бетоносмесителя являются технологическими параметрами, т.е. параметрами существенно влияющими на качество обрабатываемой цементобетонной смеси, то в процессе теоретических исследований определялись рациональные параметры, закон и области устойчивого движения вибрационной заслонки, обеспечивающие получение необходимого технологического режима.

Для определения характера движения вибрационной заслонки в рабочем режиме рассмотрим расчетную схему динамической системы «вибрационной заслонки – обрабатываемая среда» при номинальной загрузке бетоносмесителя цементобетонной смесью (Рис. 2). При этом динамическая система представлена в виде одномассной системы, взаимодействующей с цементобетонной смесью. Это допустимо, поскольку масса вибрационной заслонки на порядок меньше массы корпуса смесителя.

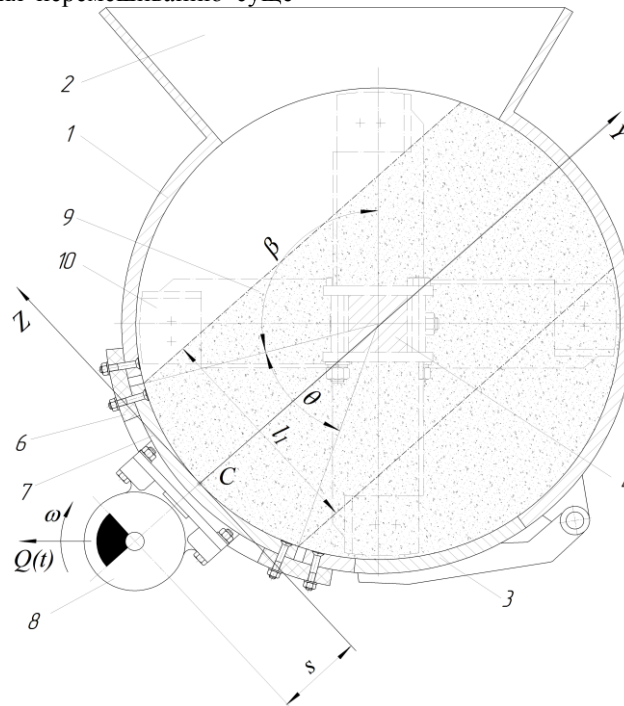


Рис. 2. Расчетная схема однолопастного вибрационного бетоносмесителя.

Под действием возмущающей силы вибровозбудителя колебаний  $Q(t)$  вибрационная заслонка будет совершать круговые колебания в направлении координат  $Z$  и  $Y$ , а также и крутильные колебания относительно оси  $X$ . Оси координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  проходят через центр тяжести  $C$  рассматриваемой динамической системы расположенной на заслонке с радиусом  $R$  (рис. 2).

Движение вибрационной заслонки можно описать следующей системой уравнений:

$$(m + m_b) \frac{d^2 y_1}{dt^2} + (b_{31} + \mu_b) \frac{dy_1}{dt} + c_{31} y_1 = Q \sin \omega t ; \tag{1}$$

$$(m + m_{b2}) \frac{d^2 z_1}{dt^2} + (b_{32} + \mu_{b2}) \frac{dz_1}{dt} + c_{32} z_1 = Q \cos \omega t ; \quad (2)$$

$$J_x \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + (n_3 + n_b) \frac{d\varphi}{dt} + k_3 \varphi = Q_s \cos \omega t , \quad (3)$$

где  $y_1, z_1$  – линейные перемещения вибрационной заслонки в направлении координат  $Y$  и  $Z$  под действием гармонических возмущающих сил  $Q \sin \omega t$  и  $Q \cos \omega t$  соответственно;

$m$  – масса вибрационной заслонки вместе с вибровозбудителем колебаний;

$t$  – время;

$c_{31}, c_{32}$  – жесткости и  $b_{31}, b_{32}$  – коэффициенты неупругих сопротивлений упругих амортизаторов (прокладок) 6 (рис. 3) в направлении координат  $Y$  и  $Z$  соответственно;

$m_b$  – приведенная масса бетонной смеси, контактирующая с вибрационной заслонкой в направлении координатной оси  $Y$ ;

$m_{b2}$  – приведенная масса бетонной смеси, контактирующая с вибрационной заслонкой в направлении координатной оси  $Z$ ;

$$m_{b2} = \frac{m_b}{2(1 + \chi)} ; \quad (4)$$

$\mu_b$  – приведенный коэффициент неупругого сопротивления бетонной смеси в направлении координатной оси  $Y$ ;

$\mu_{b2}$  – приведенный коэффициент неупругого сопротивления бетонной смеси в направлении координатной оси  $Z$ ,

$$\mu_{b2} = \frac{\mu_b}{2(1 + \chi)} ; \quad (5)$$

$\chi$  – коэффициент Пуассона;

$\varphi$  – угловое смещение вибрационной заслонки под действием возмущающего момента  $Q \cdot s \cos \omega t$ ;

$a$  – координата по оси  $Y$  от оси вибровозбудителя колебаний до центра тяжести вибрационной заслонки;

$J_x$  – совместный момент инерции масс вибрационной заслонки и вибровозбудителя колебаний относительно продольной координатной оси  $X$ ;

$k_3, n_3$  – крутильные жесткость и коэффициент неупругого сопротивления упругих амортизаторов относительно координатной оси  $X$ ,

$$k_3 = \frac{(c_{31} + c_{32}) l_1}{2} ; \quad (6)$$

$$n_3 = \frac{(b_{31} + b_{32}) l_1}{2} ; \quad (7)$$

$n_b$  – приведенный крутильный коэффициент неупругого сопротивления бетонной смеси относительно координатной оси  $X$ ,

$$n_b = \frac{\mu_b l_1}{4} . \quad (8)$$

Решение полученной системы уравнений (1 – 3) для стационарных колебаний вибрационной заслонки, описывающих её установившееся движение в рабочем режиме, найдем в следующем виде:

$$y_1(t) = A_y \sin(\omega t - \xi_1) ; \quad (9)$$

$$z_1(t) = A_z \cos(\omega t - \xi_2) ; \quad (10)$$

$$\varphi(t) = \Phi_x \cos(\omega t - \xi_3) , \quad (11)$$

где  $A_y, A_z$  – амплитуды гармонических колебаний вибрационной заслонки в направлении координат  $Y$  и  $Z$  соответственно;

$\Phi_x$  – амплитуда крутильных колебаний вибрационной заслонки относительно координатной оси  $X$ ;

$\xi_1, \xi_2$  – углы сдвига фаз между амплитудой возмущающей силы и амплитудами вынужденных колебаний вибрационной заслонки в направлении координат  $Y$  и  $Z$  соответственно;

$\xi_3$  – угол сдвига фаз между амплитудой момента возмущающей силы и амплитудой вынужденных крутильных колебаний вибрационной заслонки относительно координатной оси  $X$ ;

$$A_y = Q / \left\{ [c_{31} - (m + m_b) \omega^2]^2 + (b_{31} + \mu_b)^2 \omega^2 \right\}^{0,5} ; \quad (12)$$

$$A_z = Q / \left\{ [c_{32} - (m + m_{b2}) \omega^2]^2 + (b_{32} + \mu_{b2})^2 \omega^2 \right\}^{0,5} ; \quad (13)$$

$$\Phi_x = \frac{Q}{\sqrt{(k_3 - J_x \omega^2)^2 + (n_3 + n_b)^2 \omega^2}} ; \quad (14)$$

$$\xi_1 = \arctg \frac{(b_{31} + \mu_b) \omega}{c_{31} - (m + m_b) \omega^2} ; \quad (15)$$

$$\xi_2 = \arctg \frac{(b_{32} + \mu_{b2}) \omega}{c_{32} - (m + m_{b2}) \omega^2} ; \quad (16)$$

$$\xi_3 = \arctg \frac{(n_3 + n_b) \omega}{k_3 - J_x \omega^2} . \quad (17)$$

Используя выражения (12) и (14), определим закон движения внутренней поверхности вибрационной заслонки, контактирующей с обрабатываемой цементобетонной смесью в направлении оси  $Y$  в зависимости от координаты  $z$ :

$$y(z, t) = A_y \sin(\omega t - \xi_1) + \Phi_x z \cos(\omega t + \xi_3) . \quad (18)$$

После преобразования приведем выражение (18) к следующему виду:

$$y(z, t) = A(z) \sin[\omega t - \xi(z)], \quad (19)$$

где  $A(z)$  – амплитуда колебаний вибрационной заслонки в функции координаты  $z$ ,

$$A(z) = \sqrt{A_y^2 + \Phi_x^2 z^2 - 2\Phi_x z \sin(\xi_1 + \xi_3)}; \quad (20)$$

$\xi(z)$  – угол сдвига фаз между амплитудой возмущающей силы и амплитудой перемещения вибрационной заслонки в функции координаты  $z$ ,

$$\xi(z) = \arctg \frac{A_y \sin \xi_1 - \Phi_x z \cos \xi_3}{A_y \cos \xi_1 - \Phi_x z \sin \xi_3}. \quad (21)$$

Полученные выражения (12 – 21) позволяют установить закон движения вибрационной заслонки, взаимодействующей с цементобетонной смесью, и на основании заданных технологических режимов вибрационного воздействия на цементобетонную смесь, определить основные параметры предлагаемого вибрационного устройства.

Для оценки эффективности вибрационного воздействия на обрабатываемую бетонную смесь определим закон распространения волн деформаций и возникающих при этом напряжений в обрабатываемой среде при действии возмущающего воздействия (19) со стороны вибрационной заслонки на обрабатываемую смесь.

Движение уплотняемой среды в направлении координатной оси  $Y$  за время  $t$  может быть описано следующим волновым уравнением колебаний:

$$\eta \frac{\partial^3 u(y, z, t)}{\partial y^2 \partial t} = \rho \frac{\partial^2 u(y, z, t)}{\partial t^2} + \xi_s \frac{\partial u(y, z, t)}{\partial t}, \quad (22)$$

где  $u$ ,  $y$  – эйлерова и лагранжева координаты;

$\eta$  – коэффициент динамической вязкости бетонной смеси;

$\rho$  – плотность бетонной смеси;

$\xi_s$  – эквивалентный коэффициент сопротивления, учитывающий боковое трение виброактивного слоя смеси (выделенная область на рис. 2 с нижележащим неактивным слоем).

Решение волнового уравнения колебаний (22) будем производить при следующих граничных условиях:

$$u(0, z, t) = y(z, t) = A(z) \sin[\omega t - \xi(z)]; \quad (23)$$

$$u(H_r, z, t) = 0, \quad (24)$$

где  $H_r$  – расчетная толщина виброактивного слоя.

Представляя функцию  $u(y, z, t)$  в виде мнимой части комплексной функции

$$u(y, z, t) = U(y, z) e^{i[\omega t - \xi(z)]} \quad (25)$$

и подставляя её в волновое уравнение колебаний (22), получим

$$\frac{\partial^2 U(y, z)}{\partial y^2} + \frac{\rho \omega^2 - i \xi_s \omega}{i \eta \omega} U(y, z) = 0, \quad (26)$$

где  $U(y, z)$  – комплексная амплитуда колебаний.

Решение трансцендентного уравнения (26) представим в следующем виде:

$$U(y, z) = M(z) e^{-i \tilde{k} y} + N(z) e^{i \tilde{k} y}. \quad (27)$$

где  $M$  и  $N$  – постоянные интегрирования (комплексные амплитуды), определяемые из граничных условий (23) и (24);

$\tilde{k}$  – комплексное волновое число,

$$\tilde{k} = k - i \alpha;$$

$k$  и  $\alpha$  – волновое число и коэффициент поглощения.

Решение трансцендентного уравнения (27) для волны распространяющемся в положительном направлении можно представить в следующем виде:

$$U(y, z) = e^{-\alpha y} [M(z) \sin ky + N(z) \cos ky]. \quad (28)$$

Подставляя выражение (28) в граничное условие (24), найдем соотношение между постоянными интегрирования  $M(z)$  и  $N(z)$ :

$$M(z) = -N(z) \frac{\cos kH_r}{\sin kH_r}. \quad (29)$$

С учетом выражений (29) и (28) решение (25) волнового уравнения колебаний (22) примет следующий вид:

$$u(y, z, t) = M(z) e^{-\alpha y} \times \frac{\cos kH_r \sin ky - \sin kH_r \cos ky}{\cos kH_r} \times \sin[\omega t - \xi(z)]. \quad (30)$$

При подстановке зависимости (30) в граничное условие (23) найдем постоянную интегрирования  $M(z)$ :

$$M(z) = -A(z) \frac{\cos kH}{\sin kH}. \quad (31)$$

Подставляя выражение (31) в зависимость (30), найдем в окончательном решении волнового уравнения колебаний (22) в следующем виде:

$$u(y, z, t) = A(z) e^{-\alpha y} \frac{\sin k(H_r - y)}{\sin kH_r} \times \sin[\omega t - \xi(z)]. \quad (32)$$

Полученная зависимость (32) позволяет определить закон распространения волн деформаций в обрабатываемом слое бетонной смеси в процессе перемешивания при сложном силовом вибрационном воздействии.

Зависимость между напряжением и деформацией в обрабатываемом слое бетонной смеси определится в результате подстановки зависимости (32) в выражение

$$\sigma(y, z, t) = \eta \frac{\partial^2 u(y, z, t)}{\partial y \partial t} - \xi_s \frac{\partial u(y, z, t)}{\partial t}, \quad (32)$$

т.е.

$$u(y, z, t) = A(z)\omega e^{-\alpha y} \sqrt{(k\eta)^2 + (\alpha\eta + \xi_s)^2} \times \\ \times \frac{\cos k(H_r - y)}{\sin kH_r} \cos[\omega t - \xi(z)], \quad (33)$$

$$\text{где } \psi_1 - \text{угол сдвига фаз, } \psi_1 = \arctg \frac{\alpha\eta + \xi_s}{k\eta}. \quad (34)$$

Полученные зависимости (32) и (33) позволяют определить напряженно-деформированное состояние обрабатываемой вибрационным воздействием бетонной смеси в процессе её перемешивания в вибрационном бетоносмесителе.

Используемые выше в уравнениях волновое число  $k$  и коэффициент поглощения  $\alpha$ , приведенная масса  $m_b$  и приведенный коэффициент неупругого сопротивления бетонной смеси  $\mu_b$ , а также эквивалентный коэффициент сопротивления  $\xi_s$ , определяются следующим образом.

Эквивалентный коэффициент сопротивления  $\xi_s$ , учитывающий боковое трение виброактивного слоя смеси (выделенная область на рис. 2) с нижележащим неактивным слоем, может быть с достаточной степенью точности определен по методу линеаризации сил кулонового трения [5]:

$$\xi_s = \frac{4\rho g l_1 f_{v2} \cos \theta}{\pi A_0 \omega}, \quad (35)$$

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;

$\theta$  – угол наклона координатной оси  $Y$ .

$$k = \frac{\rho\omega}{2\eta}; \quad (36)$$

$$\alpha = \frac{\rho\omega}{2\eta} \sqrt{1 + \frac{4\xi_s\eta}{\rho^2\omega^2}}. \quad (37)$$

$$m_b = \frac{\lambda^2 \rho F_1 (\alpha + k \text{ctg} k H_r)}{\omega^2}; \quad (38)$$

$$\mu_b = F_1 \eta (\alpha + k \text{ctg} k H_r) + F_2 \xi_s. \quad (39)$$

Использование однолопастного лопастного вибрационного смесителя позволяет увеличить коэффициент заполнения лопастного смесителя до 0,6...0,65 от всего объема смесителя, в 1,6...1,8 раза уменьшить мощность привода, на 30...35% сократить продолжительность перемешивания цементобетонной смеси и обеспечить получение качественной цементобетонной смеси.

**Выводы.** Предложена новая конструкция однолопастного вибрационного лопастного смесителя, создающего в результате вибрационного воздействия в перемешиваемой цементобетонной смеси дополнительные эффекты, интенсифицирующие процесс перемешивания и повышающие качество смеси за счет разрушения агрегатов из слипшихся частиц и активации поверхностей минеральных частиц. Предложенный бетоносмеситель позволяет, повысить производительность и уменьшить установленную мощность привода.

Полученные аналитические зависимости позволяют определить закон колебательного движения вибрационной заслонки, определить напряженно-деформированное состояние бетонной смеси и установить рациональные режимы вибрационного воздействия в сочетании с механическим перемешиванием лопастным валом, подобрать рациональные параметры вибрационного смесителя, предназначенного для приготовления жестких и сверхжестких бетонных смесей, рассчитать рациональные режимы работы бетоносмесителя.

## Література

1. Саленко Ю.С. Разработка однолопастных бетоносмесителей принудительного действия / Ю.С.Саленко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 5/2009 (58). Частина 1. – С. 79 – 83.
2. Патент № 48494 України, МПК<sup>7</sup> В01F 7/04. Лопастевий змішувач примусової дії / Саленко Ю.С. / Заявник і патентовласник КрНУ ім. Михайла Остроградського; заявл. 03.08.2009; опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6.
3. ГОСТ 16349 – 85. Смесители циклические для строительных материалов. Технические условия / Международный стандарт.
4. Патент № 50096 України, МПК<sup>7</sup> В28С 5/14. Однолопастний лопастевий вібраційний бетонозмішувач / Саленко Ю.С. / Заявник і патентовласник КрНУ ім. Михайла Остроградського; заявл. 30.11.2009; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.
5. Прочность, устойчивость, колебания. – Справочник. Т.3./Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко // М.: Машиностроение, 1968. –568 с.