

УДК 693.95(075.8)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛОПАТКИ ВИБРАЦИОННОГО СМЕСИТЕЛЯ С БЕТОННОЙ СМЕСЬЮ

А.Г. Маслов, проф., д.т.н., Ю.С. Саленко, доц., к.т.н.,

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

*Аннотация.* Установлена закономерность изменения давления, действующего на лопатки смесителя со стороны виброактивированной бетонной смеси, в виде экспоненциальной зависимости, учитывающей деформационную способность бетонной смеси, окружную скорость вращения лопатки, угол поворота лопатки относительно начального положения, наружный радиус вращения и геометрические размеры лопатки, плотность и коэффициент лобового сопротивления смеси. Коэффициент лобового сопротивления смеси определяется жесткостью смеси, частотой и амплитудой вибрационного воздействия на бетонную смесь.

*Ключевые слова:* вибрационный смеситель, лопатка, бетонная смесь, взаимодействие.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЛОПАТКИ ВІБРАЦІЙНОГО ЗМІШУВАЧА З БЕТОННОЮ СУМІШШЮ

О.Г. Маслов, проф., д.т.н., Ю.С. Саленко, доц., к.т.н.,

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

*Анотація.* Встановлено закономірність зміни тиску, що діє на лопатки змішувача з боку віброактивованої бетонної суміші, у вигляді експоненційної залежності, яка враховує деформаційну здатність бетонної суміші, колову швидкість обертання лопатки, кут повороту лопатки відносно початкового положення, зовнішній радіус обертання і геометричні розміри лопатки, щільність і коефіцієнт лобового опору суміші. Коефіцієнт лобового опору суміші визначається жорсткістю суміші, частотою її амплітудою вібраційного впливу на бетонну суміш.

*Ключові слова:* вібраційний змішувач, лопатка, бетонна суміш, взаємодія.

## INVESTIGATION OF THE INTERACTION BETWEEN VIBRATORY MIXER PADDLES AND CONCRETE MIXTURE

A. Maslov, Prof., Dr., Eng. Sc., Ju. Salenko, Assoc. Prof., Cand., Eng. Sc.,  
Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University

*Abstract.* The regularity pattern of variations in pressure exerted by vibroactivated concrete mixtures and acting on mixer paddles has been ascertained, in the form of exponential dependence, considering the deformation ability of the concrete mixture, circumferential rotation rate of the paddles, the paddle rotation angle relative to the reference point, outer rotation radius and paddle dimensions, the density and the drag coefficient of the mixture. The drag coefficient is determined by the mixture stiffness, frequency and vibration amplitude impact on the concrete mixture.

*Key words:* vibratory mixer, paddle, concrete mixture, interaction.

### Введение

При наложении вибрационного воздействия бетонная смесь переходит в тиксотропное

состояние. В результате увеличивается ее текучесть, резко снижаются коэффициенты внутреннего трения и трения о корпус смесителя, уменьшается коэффициент сопротивле-

ния перемешиванию, т.е. жесткая бетонная смесь приобретает свойства пластичной бетонной смеси с осадкой конуса более 5–6 см.

### Анализ публикаций

Для определения сил сопротивления перемешиванию и мощности привода бетоносмесителей принудительного действия, предназначенных для приготовления пластичных бетонных смесей с осадкой конуса от 3,5–4 см, обычно используют полуэмпирические методы расчета [1], которые дают удовлетворительные результаты при разработке известных аналогов и не обеспечивают высокой точности при разработке принципиально новых конструкций бетоносмесителей.

При расчете сил сопротивления перемешиванию и мощности привода смесителей принудительного действия предполагают, что в процессе движения пластичная бетонная смесь ведет себя как однородная вязкая жидкость [2], а лопатка полностью или частично погружена в бетонную смесь. Такое предположение справедливо для роторных и турбинных бетоносмесителей принудительного действия. В работе [3] предложены методы расчетов сил сопротивления и мощности привода одновальных бетоносмесителей принудительного действия [4] с постоянными формами лопастей, у которых транспортирование бетонной смеси в процессе перемешивания осуществляется одновременно двумя противоположно направленными потоками (по периферии корпуса и в его центральной части). Однако силы сопротивления, действующие в процессе перемешивания пластичной смеси в одновальных бетоносмесителях принудительного действия, в этих работах приняты постоянными, чем существенно отличаются от сил сопротивления, реально возникающих в одновальных бетоносмесителях [4]. Поэтому существующие методы расчетов сил сопротивления и мощности привода одновальных бетоносмесителей с вибрационной активацией требуют дальнейшего уточнения.

### Цель и постановка задачи

Целью работы является определение сил сопротивления перемешиванию в бетоносмесителях принудительного действия на основе изучения процесса взаимодействия лопаток бетоносмесителя с приготавливаемой пла-

стичной цементобетонной смесью, повышенная пластичность которой вызвана наложением вибрационного воздействия.

### Материал и результаты исследования

Установлено, что в процессе работы бетоносмесителей принудительного действия перед лопатками образуется ядро уплотнения [3] в виде клина, формы и геометрические размеры которого определены в работе [3].

Для определения давления, действующего на центральные и периферийные лопатки [4] в направлении их движения со скоростью  $V$ , в работе [3] использовалась преобразованная формула Ньютона

$$q = c\rho V^2, \quad (1)$$

где  $q$  – давление смеси на лопатку в направлении ее движения, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – линейная скорость движения лопатки, м/с;  $c$  – коэффициент сопротивления движению лопатки в цементобетонной смеси в направлении движения смеси.

В формуле (1) коэффициент сопротивления  $c$  принимался в виде постоянной величины для определенного состава и консистенции цементобетонной смеси без учета основных параметров смесителя.

В процессе проведенных теоретических и экспериментальных исследований нами было установлено, что коэффициент лобового сопротивления движению лопаток в пластичной смеси имеет переменное значение и зависит от геометрических параметров смесителя и лопаток, величины заполнения смесью корпуса смесителя, деформационной способности смеси и др. При этом коэффициент лобового сопротивления движению лопаток в смеси можно выразить в виде следующей функции, параметры которой определяются в зависимости от геометрических размеров и типов лопаток, области их взаимодействия с цементобетонной смесью и сцепления между частицами смеси.

$$c = f(x, \varphi). \quad (2)$$

На этом основании последовательно определим энергию, затрачиваемую на перемешивание смеси вначале периферийными лопастями, а затем и внутренними.

В первом приближении коэффициент лобового сопротивления для периферийных лопаток может быть выражен такой зависимостью

$$c = c_0 \exp\left(-\varphi \cdot \mu - \frac{r_0 - x_1}{r_0} \lambda\right), \quad (3)$$

где  $c_0$  – коэффициент лобового сопротивления смеси при вхождении лопатки в соприкосновение с плотным слоем смеси, образуемым после её падения из свободной зоны перемешивания, т.е. при  $\varphi = 0$  (рис. 1);  $r_0$  – радиус цилиндрической поверхности корпуса смесителя;  $\varphi$  – угол поворота лопатки от нулевого значения;  $x_1$  – координата от оси вращения лопастного вала до рассматриваемой поверхности на лопатке;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий деформационную способность цементобетонной смеси;  $\lambda$  – экспериментальный коэффициент.

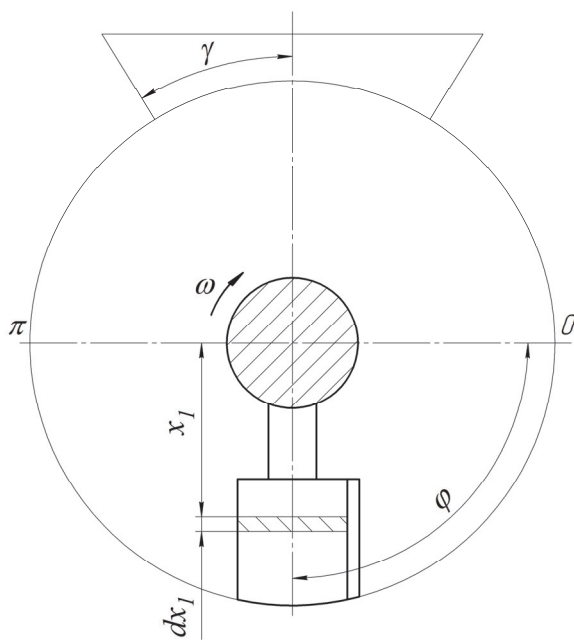


Рис. 1. Расчетная схема лопасти смесителя

На основании выражения (3) формула (1) преобразуется к следующему виду

$$q = c_0 \rho V^2 \exp\left(-\varphi \cdot \mu - \frac{r_0 - x_1}{r_0} \lambda\right). \quad (4)$$

Из выражения (4) найдем среднее значение давления, изменяемого по координате  $x_1$

$$q_s = \frac{1}{r_0 - r_1} \int_{r_1}^{r_0} c_0 \rho V^2 \exp\left(-\varphi \cdot \mu - \frac{r_0 - x_1}{r_0} \lambda\right) dx_1 = \\ = \frac{c_0 \rho V^2 r_0 \exp(-\varphi \cdot \mu)}{\lambda(r_0 - r_1)} \left[1 - \exp\left(-\frac{r_0 - r_1}{r_0} \lambda\right)\right], \quad (5)$$

где  $r_1$  – внутренний радиус лопатки.

Мощность, затрачиваемая на перемешивание смеси периферийной лопаткой, будет складываться из нескольких величин: мощности, требуемой на преодоление сил сопротивления перемещению лопатки по окружности, сил трения бетонной смеси о корпус смесителя от действия инерционных сил и сил тяжести, сил внутреннего трения от действия столба бетонной смеси на ядро уплотнения, а также на преодоление сил тяжести ядра уплотнения.

Так как окружная скорость лопатки  $V$  имеет переменную величину и зависит от радиуса вращения, то выделим элементарную площадку (рис. 1) и определим элементарную силу сопротивления

$$dF_1 = q_s dS = \frac{c_0 \rho V^2 r_0 \exp(-\varphi \cdot \mu)}{\lambda(r_0 - r_1)} \times \\ \times \left[1 - \exp\left(-\frac{r_0 - r_1}{r_0} \lambda\right)\right] dS, \quad (6)$$

где  $dS$  – площадь элементарной площадки,  $dS = b_1 \cos \alpha_1 \cdot dx_1$ ;  $b_1$  – ширина периферийной лопатки;  $\alpha_1$  – угол наклона рабочей поверхности периферийной лопатки к плоскости, параллельной оси вала (рис. 1);  $V_x$  – окружная скорость выделенной элементарной площадки,  $V_x = \omega x_1$ .

Подставляя в выражение (6) значения  $dS$  и  $V_x$ , получим

$$dF_1 = q_s dS = \frac{c_0 \rho \omega^2 b_1 r_0 \cos \alpha_1 \exp(-\varphi \cdot \mu)}{\lambda(r_0 - r_1)} \times \\ \times \left[1 - \exp\left(-\frac{r_0 - r_1}{r_0} \lambda\right)\right] x_1^2 dx_1. \quad (7)$$

Элементарная работа по преодолению элементарной силы лобового сопротивления

$dF_1$  на элементарном участке вращения (элементарной дуге)  $dl_1 = x_1 \cdot d\varphi$  будет равна

$$dW_1 = dF_1 dl = \frac{c_0 \rho \omega^2 b_1 r_0 \cos \alpha_1}{\lambda(r_0 - r_1)} \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r_0 - r_1}{r_0} \lambda\right) \right] \times \exp(-\phi \cdot \mu) x_1^3 dx_1 d\varphi. \quad (8)$$

За один оборот лопастного вала каждая периферийная лопатка испытывает лобовое сопротивление на участке, определяемом углом  $\varphi$ , т.е. в диапазоне от  $\varphi=0$  до  $\varphi = 1,5\pi - \gamma_1$  (рис. 1).

Тогда полная работа для преодоления сил лобового сопротивления периферийной лопаткой при ее перемещении на участке от  $\varphi=0$  до  $\varphi = 1,5\pi - \gamma_1$  будет равна

$$W_1 = \frac{c_0 \rho \omega^2 b_1 r_0 \cos \alpha_1}{\lambda(r_0 - r_1)} \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r_0 - r_1}{r_0} \lambda\right) \right] \times \int_{r_1}^{r_0} \int_0^{1,5\pi - \gamma_1} \exp(-\phi \cdot \mu) x_1^3 dx_1 d\varphi = \frac{c_0 \rho \omega^2 b_1 r_0 (r_0^4 - r_1^4) \cos \alpha_1}{4\lambda(r_0 - r_1)} \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r_0 - r_1}{r_0} \lambda\right) \right] \times \frac{1 - \exp[-\mu(1,5\pi - \gamma)]}{\mu}. \quad (9)$$

Мощность привода для преодоления сил лобового сопротивления лопатками смесителя определится из следующего выражения

$$P = \lambda_1 \frac{W_1 z \cdot \omega}{2\pi \eta_{06}}, \quad (10)$$

где  $\eta_{06}$  – общий коэффициент полезного действия привода;  $\lambda_1 \approx 1,05-1,1$  – коэффициент, учитывающий заклинивание и дробление материала между лопатками и корпусом смесителя;  $z$  – количество лопаток.

Основной зависимостью, являющейся основой для определения сил сопротивления и мощности привода вибрационного бетоносмесителя при вибромеханическом перемешивании смеси, является экспоненциальная зависимость (3), в которой коэффициент лобового сопротивления смеси  $c_0$  при вхождении лопатки в соприкосновение с плотным слоем смеси, образуемым в начале совместного движения лопатки и бетонной смеси от нулевого положения, может быть с достаточной степенью точности определен из следующей зависимости

$$c_0 = \left( \frac{gJ}{A\omega} \right)^\Delta, \quad (11)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $J$  – жесткость бетонной смеси, определяемая по методу Скрамтаева, с;  $A$  – амплитуда вынужденных колебаний рабочего органа, м;  $\omega$  – угловая частота вынужденных колебаний, рад/с;  $\Delta$  – показатель степени,  $\Delta=0,275$ .

Приведенная зависимость может быть использована при определении коэффициента лобового сопротивления  $c_0$  для бетонной смеси жесткостью от 30 до 180 с, определяемой по методу Скрамтаева.

Входящие в формулу (3) коэффициент  $\mu$ , учитывающий деформационную способность цементобетонной смеси, и экспериментальный коэффициент  $\lambda$  имеют следующие значения:  $\mu=0,5$ ;  $\lambda=0,35$ .

Полученные зависимости позволяют достаточно точно определить силы сопротивления, возникающие в процессе перемешивания цементобетонной смеси, и мощность привода в зависимости от основных параметров однофазного бетоносмесителя принудительного действия и консистенции цементобетонной смеси, вида и формы вибрационного воздействия на бетонную смесь. Они также позволяют обосновать конструктивную форму лопастей и минимизировать расход энергии, затрачиваемой на процесс перемешивания, сочетающего механическое перемешивание лопастным валом с одновременным приложением вибрационного воздействия.

### Выводы

Впервые установлена закономерность изменения давления, действующего на лопасти смесителя со стороны виброактивированной бетонной смеси, в виде экспоненциальной зависимости, учитывающей деформационную способность бетонной смеси, окружную скорость вращения лопасти, угол поворота лопасти относительно начального положения, наружный радиус вращения и геометрические размеры лопасти, плотность и коэффициент лобового сопротивления смеси.

### Литература

1. Королев К.М. Методика расчета лотковых смесителей / К.М. Королев // Строительные и дорожные машины. – 1985. – №1. – С. 14–16.
2. Морозов М. К. Механическое оборудование заводов сборного железобетона / М.К. Морозов. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1977. – 264 с.
3. Маслов А.Г. Определение рациональных параметров однофазного бетоносмесителя принудительного действия / А.Г. Маслов, Ю.С. Саленко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: зб. наук. пр. – 2007. – Вип. 1/ (42), Ч. 1. – С. 71–75.
4. Патент 9899 Україна, 7 В28В 5/00. Лопатевий змішувач / Маслов О.Г., Саленко Ю.С.; заявник і патентовласник Кременчуцький державний політехнічний університет. – № u200503662; заявл. 18.04.05; опубл. 17.10.05, Бюл. № 10.

Рецензент: Е.С. Венцель, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 11 июня 2014 г.

---

---