

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.12737/24628

Теличенко В.И., д-р техн. наук, проф.,  
Кайтуков Б.А., канд. техн. наук, доц.,  
Скель В.И., канд. техн. наук, доц.,

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ РОТОРНЫХ БЕТОНОСМЕСИТЕЛЕЙ

PRESIDENT@mgsu.ru

В статье рассматривается определение оптимальной скорости движения лопастей роторных бетоносмесителей по критерию минимизации удельных приведенных затрат на единицу выпускаемой продукции, включающие эксплуатационные затраты и капитальные вложения: затраты на сырье и материалы в технологическом процессе; затраты на заработную плату рабочих; суммарные затраты на амортизацию и капитальный ремонт; затраты на текущее обслуживание и текущие ремонты; затраты на электроэнергию; затраты на смазочные материалы; затраты на сменную оснастку; капитальные вложения на покупку машины и т.п. Все затраты и вложения анализируются с точки зрения влияния скорости движения лопастей на соответствующий показатель. В результате получена функциональная зависимость между всеми составляющими удельных приведенных затрат на единицу выпускаемой продукции и скоростью движения лопастей роторных бетоносмесителей. На основании анализа известных данных эта зависимость принята параболической (квадратичной). Сравнение результатов расчета для роторных бетоносмесителей средней емкости с опубликованными данными дает хорошую сходимость.

**Ключевые слова:** роторный бетоносмеситель, интенсификация, производительность, скорость движения лопастей ротора, приведенные затраты.

Анализ выпускаемых бетоносмесителей показывает, что с целью повышения интенсификации процесса перемешивания компонентов бетонов или строительных растворов конструктора и производители стремятся к повышению скоростей движения лопастей роторных бетоносмесителей принудительного действия [1]. Поэтому задача определения оптимальных скоростей движения лопастей роторных бетоносмесителей является актуальной.

Особенностью процесса перемешивания бетонов и строительных растворов в смесителях роторного типа является изменение скорости движения лопастей с изменением нагрузок на рабочие органы – лопасти. С повышением скорости движения лопастей значительно возрастает мощность двигателя, увеличивается масса смесителя, энергоемкость процесса перемешивания и, вследствие возрастания нагрузок, форсируется износ рабочих органов смесителя [2, 3]. Важно отметить и тот факт, что при повышении скорости выше некоторого оптимального значения, качество бетона снижается из-за сегрегации смеси [4–6].

Для определения оптимальных скоростей движения нами принят критерий минимизации удельных приведенных затрат на единицу вы-

пускаемой продукции, включающие эксплуатационные затраты и капитальные вложения.

В общем виде удельных приведенных затрат на единицу выпускаемой продукции в руб./м<sup>3</sup> будут:

$$Z_y = (S + E_n \cdot C) / \Pi_r, \quad (1)$$

где  $S$  – текущие годовые затраты, которые связаны с эксплуатацией бетоносмесителей, руб./год;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности;  $C$  – капитальные вложения, приведенные к первому году эксплуатации руб./год;  $\Pi_r$  – годовая эксплуатационная производительность, м<sup>3</sup>/год.

Текущие годовые затраты определяются по формуле:

$$S = S_m + S_{зп} + S_{ам,кр} + S_{то,р} + S_э + S_{см} + S_{со}, \quad (2)$$

где  $S_m$  – затраты на сырье и материалы в технологическом процессе;  $S_{зп}$  – затраты на заработную плату рабочих;  $S_{ам,кр}$  – суммарные затраты на амортизацию и капитальный ремонт;  $S_{то,р}$  – затраты на текущее обслуживание и текущие ремонты;  $S_э$  – затраты на электроэнергию;  $S_{см}$  – затраты на смазочные материалы;  $S_{со}$  – затраты на сменную оснастку.

В такой постановке задача сводится к определению функциональных зависимостей статей затрат от скорости движения лопастей роторных бетоносмесителей.

При определении затрат на материалы важное значение имеют эти затраты, расходуемые на 1 м<sup>3</sup> бетона. Стоимость этих материалов определяется суммой затрат на заполнители: цемент, воду и добавки [7, 8]. Известно, что прочность бетона изменяется с изменением скорости перемешивания, что позволяет в процессе перемешивания в некотором диапазоне скоростей снизить расход цемента, не снижая требуемой прочности бетона. Затраты на другие материалы будут неизменными. В зависимости от состава смеси и других условий технологии изготовления изделий, изменение прочности бетона в интервале 1...1,5 МПа, эквивалентного изменению расхода цемента на 1...1,2 %. На рис. 1 представлена зависимость расхода цемента на 1 м<sup>3</sup> тяжелых бетонов от скорости движения лопастей с учетом изменения прочности бетона в интервале 1...1,5 МПа.

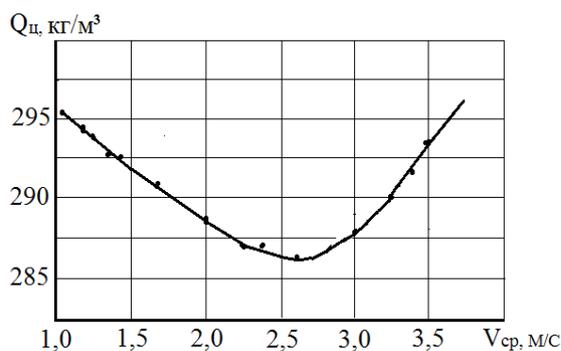


Рис. 1. Зависимость расхода цемента на 1 м<sup>3</sup> тяжелых бетонов в зависимости от скорости движения лопастей

Характер кривой на рис. 1 показывает, что она может быть описана уравнением:

$$y = ax^2 - bx + c. \quad (3)$$

Коэффициенты уравнения (3)  $a$ ,  $b$  и  $c$  определяются методом наименьших квадратов при условии, что известна цена 1 т цемента. Значения этих коэффициентов и зависимость расхода цемента  $Q_{ц} = k(V_{ср})$  можно представить в следующем виде в кг/м<sup>3</sup>:

$$Q_{ц} = 3V_{ср}^2 - 14V_{ср} + 305, \quad (4)$$

Изменение удельных затрат на материалы в зависимости от скорости движения лопастей при условии, что известна цена 1 т цемента [7] будут, руб/м<sup>3</sup>:

$$S_{м} = (37V_{ср}^2 - 173V_{ср} + 3400) \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$

Важной составляющей удельных приведенных затрат являются затраты на заработную плату производственных рабочих. Затраты труда на приготовление бетонной смеси изменяются в зависимости от возможностей предприятия, схемы компоновки технологического оборудования, уровня механизации и автоматизации процесса производства бетона. По данным работ [1, 9], затраты на типовом бетоносмесительном узле с 4-мя бетоносмесителями по 1500 л. составляют 0,35...0,55 чел·ч/м<sup>3</sup>, а на аналогичном узле с 8-ю бетоносмесителями по 1500 л. – 0,2...0,4 чел·ч/м<sup>3</sup>. Проектные затраты на зарплату производственных рабочих на автоматизированном бетонном заводе с 2-мя бетоносмесителями принудительного действия емкостью 1000 л., составляют 38 руб/м<sup>3</sup>, но следует отметить, что фактические затраты превышают расчетные. Для бетонных заводов средней мощности, оснащенных бетоносмесителями принудительного действия, работающих при скорости движения  $V_{ср} = 1,6...2$  м/с, удельные приведенные затраты на заработную плату рабочих  $S = 38$  руб/м<sup>3</sup>, тогда удельные расходы на заработную плату будут:

$$S'_{зп} = K_{пер} \cdot S, \quad (6)$$

где  $K_{пер}$  – коэффициент перехода от тарифного фонда заработной платы к фонду, который учитывает начисления; принимаем  $K_{пер} = 1,4$ .

По формуле (6)  $S'_{зп} = 38 \cdot 1,4 = 53,2$  руб/м<sup>3</sup>.

Удельные приведенные затраты на заработную плату можно определить как отношение суммы зарплаты, расходуемой в единицу времени  $Z_{зп}$ , к производительности  $\Pi_3$

$$S_{зп} = Z_{зп} / \Pi_3. \quad (7)$$

Часовая эксплуатационная производительность была ранее определена авторами и имеет вид:

$$\Pi_3 = \Pi_T \cdot K_{ти}, \quad (8)$$

где  $\Pi_T$  – техническая производительность бетоносмесителя, м<sup>3</sup>/ч;  $K_{ти}$  – коэффициент перехода,  $K_{ти} = 0,5$ .

В формуле (8) техническая производительность в определяется по зависимости, м<sup>3</sup>/ч:

$$\Pi_T = 25V_T \cdot V_{ср}, \quad (9)$$

где  $V_T$  – объем готового замеса, м<sup>3</sup>;  $V_{ср}$  – средняя скорость движения лопастей, м/с.

Тогда окончательно часовая эксплуатационная производительность роторных бетоносмесителей будет:

$$\Pi_3 = 12,5V_T \cdot V_{ср}. \quad (10)$$

Учитывая динамику изменения удельных затрат на зарплату в функции скорости движения лопастей, эти затраты можно описать зависимостью:

$$S_{\text{зн}} = U/V_{\text{ср}}, \quad (11)$$

где  $U$  – постоянный коэффициент, имеющий размерность, руб/(с·м<sup>2</sup>).

Ранее для определенных условий работы было принято  $S'_{\text{зн}} = 0,28$  руб/м<sup>3</sup>. Тогда  $U = 0,504$  руб/(с·м<sup>2</sup>).

Изменение удельных приведенных затрат на заработную плату в зависимости от скорости по формуле (11) будет, руб/м<sup>3</sup>:

$$S_{\text{зн}} = 0,504/V_{\text{ср}}. \quad (12)$$

Следующей составляющей в суммарных затратах являются затраты на электроэнергию. Необходимо установить зависимость удельных энергозатрат на приготовление бетонной смеси от скорости движения лопастей.

Энергия, затрачиваемая на перемешивание бетонной смеси, определяется отношением мощности двигателя  $P_{\text{дв}}$  к производительности  $\Pi_r$ , тогда:

$$\Theta = P_{\text{дв}}/\Pi_r, \quad (13)$$

Мощность, затрачиваемая на вращение лопастей, определяется по зависимости, кВт:

$$P_{\text{дв}} = K_c \cdot \Sigma F \cdot V_{\text{ср}} \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где  $K_c$  – коэффициент сопротивления движению лопастей в смеси, Па;  $\Sigma F$  – суммарная активная площадь лопастей, м<sup>2</sup>;  $V_{\text{ср}}$  – окружная скорость, м/с.

Тогда по формулам (13), (14) и (9) определяем энергию, затрачиваемую на вращение лопастей, кВт·ч/м<sup>3</sup>:

$$\Theta = K_c \cdot \Sigma F / (25 \cdot 10^3 \cdot V_r), \quad (15)$$

где  $V_r$  – объем готового замеса, м<sup>3</sup>.

Принимаем отношение  $\Sigma F/V_r$ , равное 0,3. Тогда по формуле (15) энергия, затрачиваемая на перемешивание бетонной смеси определяется по зависимости, кВт·ч/м<sup>3</sup>:

$$\Theta = 0,3 \cdot K_c / (25 \cdot 10^3), \quad (16)$$

В формуле (16) величина  $K_c$  зависит от свойств смеси и режима работы бетоносмесителя.

Попытки установить функциональную зависимость коэффициента сопротивления движению лопастей  $K_c$  от скорости их движения предпринимались разными авторами [10]. В исследованиях, которые провел Н.А. Сапелин для тяжелых бетонных смесей, эта зависимость имеет вид в Па:

$$K_c = (25,69 + 4,88V_{\text{ср}}^2 - 1,51V_{\text{ср}}) \cdot 10^{-3}. \quad (17)$$

Подставляя выражение (17) в формулу (16) получаем зависимость для определения энергии, затрачиваемая на перемешивание бетонной смеси, кВт·ч/м<sup>3</sup>:

$$\Theta = 0,1V_{\text{ср}}^2 - 0,02V_{\text{ср}} + 0,31. \quad (18)$$

При установившейся цене электроэнергии  $\Pi_6 = [\text{руб}/(\text{тыс.кВт}\cdot\text{ч})]$  удельные приведенные затраты на электроэнергию в функции скорости движения лопастей будет, руб/м<sup>3</sup>:

$$S_3 = (0,1V_{\text{ср}}^2 \cdot \Pi_6 - 0,02V_{\text{ср}} \cdot \Pi_6 + 0,31\Pi_6) \cdot 10^{-3}. \quad (19)$$

Для определения удельных капитальных вложений в зависимости от скорости движения лопастей, примем капитальные вложения  $C$  на технику равные балансовой стоимости машины  $\Pi_6$ , руб. Тогда

$$C = \Pi_6 = K_6 \cdot \Pi, \quad (20)$$

где  $K_6$  – коэффициент перехода от оптовой цены к балансовой стоимости,  $K_6 = 1,14$ ;  $\Pi$  – оптовая цена машины, руб.

Цену «будущей» машины можно определить по выражению:

$$\Pi \approx C_{\text{и}} \cdot (1 + P_{\text{а}}), \quad (21)$$

где  $C_{\text{и}}$  – себестоимость изготовления машины, руб;  $P_{\text{а}}$  – рентабельность, руб.

Цена машины определяется в соответствии с методикой, изложенной в работе [1]:

$$\Pi = \beta \cdot G_{\text{б}}, \quad (22)$$

где  $\beta$  – коэффициент корреляции между ценой и массой машины, руб/кг,  $\beta = 0,64$ ;  $G_{\text{б}}$  – масса бетоносмесителя, кг.

Расчет удельных капитальных затрат предполагает определение зависимости изменения массы бетоносмесителя от скорости движения лопастей. Для этого воспользуемся зависимостью между весом бетоносмесителя и мощностью двигателя  $P_{\text{пр}}$ , приведенной в работе [1]:

$$G_{\text{б}} = (119 \dots 120) \cdot P_{\text{пр}}. \quad (23)$$

С учетом формулы (14) для определения мощности двигателя получим выражение:

$$G_{\text{б}} \approx 120K_c \cdot \Sigma F \cdot V_{\text{ср}} \cdot 10^{-3}. \quad (24)$$

Тогда оптовая цена бетоносмесителя по формуле (22) будут, руб:

$$\Pi = 76,8K_c \cdot \Sigma F \cdot V_{\text{ср}} \cdot 10^{-3}. \quad (25)$$

Капитальные вложения по формуле (20), руб:

$$C = 76,8K_c \cdot \Sigma F \cdot V_{\text{ср}} \cdot 10^{-3}. \quad (26)$$

Удельные приведенные капитальные затраты определяются:

$$S_k = E_n \cdot C / \Pi_r, \quad (27)$$

где  $E_n$  – нормативный коэффициент,  $E_n = 0,15$ .

С учетом того, что  $\sum F/V_r = 0,3$  и подставив  $K_c$ , получим выражение для определения удельных приведенных капитальных затрат, руб./м<sup>3</sup>:

$$S_k = (0,73 V_{cp}^2 - 0,23 V_{cp} + 3,86) \cdot 10^{-3}. \quad (28)$$

Удельные приведенные затраты на реновацию и капитальный ремонт бетоносмесителя определяются:

$$Z_{ap} = K_{ap} \cdot Ц_б, \quad (29)$$

где  $Z_{ap}$  – амортизационные отчисления;  $K_{ap}$  – норма амортизации,  $K_{ap} = 0,12$ ;  $Ц_б$  – балансовая стоимость бетоносмесителя.

$$Z_{kp} = K_{kp} \cdot Ц_б, \quad (30)$$

где  $Z_{kp}$  – затраты на капитальный ремонт;  $K_{kp}$  – норма расходов на капитальный ремонт,  $K_{kp} = 0,133$ .

Суммарные удельные затраты на реновацию и капитальный ремонт:

$$S_{am,kr} = (Z_{ap} + Z_{kp}) / \Pi_r = 0,25 \cdot Ц_б / \Pi_r, \quad (31)$$

С учетом  $\Pi_r$  и  $Ц_б$  затраты определяются по формуле, руб./м<sup>3</sup>:

$$S_{am,kr} = (1,1 V_{cp}^2 - 0,38 V_{cp} + 6,94) \cdot 10^{-3}. \quad (32)$$

Удельные приведенные затраты на техническое обслуживание и текущие ремонты бетоносмесителя будут:

$$Z_p = C_p \cdot T_r / T_p, \quad (33)$$

где  $C_p$  – стоимость текущих ремонтов и технического обслуживания;  $T_r$  – годовой фонд времени,  $T_r = 2560$  ч.;  $T_p$  – периодичность текущих ремонтов,  $T_p = 1000 \dots 2000$  ч.

Межремонтный цикл определяется зависимостью, ч.:

$$T_p = 20,7 \cdot 10^6 / (K_c \cdot \sum F \cdot V_{cp}), \quad (34)$$

Окончательно удельные приведенные затраты на техническое обслуживание и текущие ремонты можно определить, руб./м<sup>3</sup>:

$$S_p = Z_p / \Pi_r = C_p \cdot T_r \cdot K_c \cdot \sum F \cdot V_{cp} / (25 V_r \cdot V_{cp} \cdot 20,7 \cdot 10^6). \quad (35)$$

Приняв в (35)  $\sum F/V_r = 0,3$ , получим затраты, руб./м<sup>3</sup>:

$$S_p = (2,2 V_{cp}^2 - 0,66 V_{cp} + 11,18) \cdot 10^{-3}. \quad (36)$$

Удельные приведенные затраты на смазочные и вспомогательные материалы определяются как и затраты на электроэнергию:

$$S_{cm} = \alpha \cdot \mathcal{E}, \quad (37)$$

где  $\alpha$  – стоимость смазочных материалов на 1 кВт·ч,  $\alpha = 15,2$  руб./кВт·ч;  $\mathcal{E}$  – энергия, которая определяется по формуле (18).

Удельные приведенные затраты на сменную оснастку зависят от условий эксплуатации и режимов работы бетоносмесителей и других машин подобного рода [11]. Эти затраты принимаются в пределах 3...5 % от суммы остальных статей затрат, т.е.  $K_{осн} = 1,04$ .

С целью определения функциональной зависимости приведенных затрат от скорости движения лопастей ротора, необходимо суммировать все составляющие затраты формулы (2), а именно: затраты по материалам – формула (5), по заработной плате – (12), на электроэнергию – (19), на реновацию и капитальный ремонт – (32), на техническое обслуживание и текущие ремонты – (36), на смазочные материалы – (37), на оснастку с учетом капитальных вложений – (28) и производительности. Подставив перечисленное в формулу (1), окончательно получим, руб./м<sup>3</sup>:

$$Z_y = (45,5 V_{cp}^2 - 179,6 V_{cp} + 2556 + 50,4 / V_{cp}) \cdot 10^{-3}. \quad (38)$$

Для определения оптимальной скорости движения лопастей ротора, при которой удельные затраты будут минимальны, следует взять от функции (38) первую производную и приравнять к нулю:

$$Z_y' = 0. \quad (39)$$

Решение уравнения (39) в функции скорости движения лопастей роторных бетоносмесителей дает значение  $V_{cp} = 2,59 \approx 2,6$  м/с. Для бетоносмесителей средней емкости такая скорость ( $V_{cp} \approx 2,6$  м/с) представляется оптимальной, что показывают результаты исследований [1], в которых скорость лопастей бетоносмесителей находится в пределах от 1,84 м/с до 3,53 м/с.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Густов Ю.И., Кайтуков Б.А., Григорьева М.Н. Повышение эффективности работы роторного бетоносмесителя принудительного действия // Механизация строительства. 2016. №11. С. 26–29.
2. 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.
3. Богомоллов А.А. О сущности процесса смешивания и его критериях // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2005. № 9. С. 301.

4. Хархардин А.Н., Погорелов С.А., Топчиев А.И. Топологические особенности формирования плотной структуры бетонов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2000. № 10. С. 47.

5. Богомолов А.А. Теоретические и технические основы совершенствования смесительных машин для приготовления строительных смесей. Монография. Белгород, 2010.

6. Шарапов Р.Р., Шаптала В.Г., Алфимова Н.И. Прогнозирование дисперсных характеристик высокодисперсных цементов // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 24–25.

7. Теличенко В.И., Прокопенко В.С., Шарапов Р.Р., Бойчук И.П. Моделирование осаждение цемента в технологической системе замкнутого цикла с рециркуляцией // Механизация строительства. 2016. №11. С. 5–8.

8. Нерхольм А. Измельчение цемента. Симпозиум по производству цемента. М.: НИИЦемент, 1979.

9. Королев К.М. Передвижные бетонорастворосмесители и бетонорастворонасосные установки. Изд.2-е. М.: Высшая школа, 1991. 207 с.

10. Сапелин Н.А., Бурьянов А.Ф. Зависимости прочности бетонов на основе неорганических вяжущих от средней плотности // Строительные материалы. 2001. №6. С. 36–38.

11. Теличенко В.И., Шарапов Р.Р., Скель В.И., Харламов Е.В. Анализ эффективности процесса измельчения в шаровых мельницах замкнутого цикла // Механизация строительства. 2016. №11. С. 13–17.

---

**Telichenko V.I., Kaitukov B.A., Skel V.I.**

#### **THE DETERMINATION OF OPTIMAL SPEEDS OF THE ROTARY BLADES OF CONCRETE MIXERS**

*The article discusses the determination of optimum speed of movement of the blades of rotary mixers on the criterion of minimizing the specific costs per unit of products, including operating costs and capital investments: the cost of raw materials in the technological process; cost of wages of employees; total costs of depreciation and overhaul costs routine maintenance and minor repairs; energy costs; the cost of lubricants; the cost of replacement tooling; capital investments for the purchase of machines, etc. All costs and investments are analyzed from the point of view of influence of speed of movement of the blades in the corresponding figure. The result is a functional dependence between all components of the specific costs for a unit of output and speed of movement of the blades of rotary mixers. Based on the analysis of known data, this dependence is accepted parabolic (quadratic). Comparison of the results of the calculation for rotary mixers high capacity with published data yields good convergence.*

**Key words:** rotary mixer, intensification, productivity, speed of movement of the blades of the rotor, given the costs.

---

**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

**Кайтуков Батраз Амурханович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Механизация строительства».

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

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

E-mail: KaitukovBA@gic.mgsu.ru

**Скель Владимир Израилевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Механизация строительства».

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.

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

E-mail: skelvi@mgsu.ru