

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОВАЛЬНОГО БЕТОНОСМЕСИТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ ЛОПАСТЕЙ

Описаны конструкция и принцип действия одновального бетоносмесителя принудительного действия, снабженного лопастями с переменной формой. Составлены расчётные схемы и определены силы сопротивления, действующие на лопасти смесителя в процессе приготовления бетонных смесей. Установлены закономерности изменения энергоёмкости процесса перемешивания бетонной смеси в зависимости от радиуса обечайки корпуса смесителя, высоты лопаток, консистенции смеси, внутреннего коэффициента трения и коэффициента трения смеси о стенки корпуса смесителя, коэффициента заполнения смесью корпуса смесителя.

Ключевые слова: *смеситель принудительного действия, бетонные смеси, коэффициент сопротивления.*

Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными и практическими задачами. Создание бетоносмесителей принудительного действия, сочетающих в себе высокие показатели производительности и качества приготовляемой смеси с его простотой конструкции и сравнительно малыми значениями металлоёмкости и энергоёмкости, является важной народнохозяйственной задачей. При этом важную роль в разработке бетоносмесителей нового класса играет внедрение в процесс перемешивания новых эффектов, обеспечивающих повышение качества приготовления жёстких и сверхжёстких бетонных смесей с низкой энергоёмкостью. В то же время создание принципиально новых эффектов и способов перемешивания, а также разработка принципиально новых конструкций смесителей, удовлетворяющих современному производству, не возможны без точного определения характера изменения сил сопротивления в процессе перемешивания бетонной смеси.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых впервые предлагалось решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение не решенных прежде задач общей проблемы, которым посвящается указанная статья. Для определения сил сопротивления перемешиванию в лопастных смесителях принудительного действия обычно используют эмпирические и полуэмпирические методы расчётов [1], которые в первом приближении дают удовлетворительные результаты при разработке известных аналогов,

но не обеспечивают необходимой точности при разработке принципиально новых конструкций бетоносмесителей[2].

Установлено [3], что в процессе поворота лопатки от нулевого (горизонтального) положения до выхода в свободную зону коэффициент сопротивления бетонной смеси перемешиванию не остается постоянным, а изменяется по некоторому экспоненциальному закону в зависимости от угла поворота, геометрических размеров лопатки и корпуса смесителя, физико-механических характеристик бетонной смеси.

Переменный характер изменения сил сопротивления вызывает определенную трудность в определении энергоёмкости процесса перемешивания. Неправильное определение энергоёмкости процесса перемешивания может привести не только к увеличению мощности привода и перерасходу энергии на перемешивание, но и удлинит продолжительность процесса перемешивания, усложняет конструкцию бетоносмесителя.

Формулирование целей статьи (постановка задачи). Цель работы – определение энергоёмкости процесса перемешивания одновальным бетоносмесителем принудительного действия с переменной формой лопастей.

Изложение основного материала исследования с полным обоснованием научных результатов. На рисунке 1 представлен предлагаемый одновальный лопастной смеситель с переменными формами лопастей. Одновальный лопастной смеситель включает корпус 1 с загрузочным 2 и выгрузочным, закрытым заслонкой 3 отверстиями и центральный лопастной вал 4, который при помощи подшипниковых опор 5 установлен внутри корпуса 1. Центральный лопастной вал 4 снабжён периферийными лопастями, выполненными в виде стоек 6 и закрепленными на них при помощи резьбовых соединений 7 периферийных лопаток 8 и внутренними лопастями, выполненными в виде стоек 9 и закрепленных на них при помощи резьбовых соединений 10 внутренних лопаток 11, имеющими наружный радиус вращения, равный $0,65...0,85$ наружного радиуса вращения периферийных лопаток. Периферийные и внутренние лопасти попарно сблокированы, имеют одну систему крепления при помощи резьбовых соединений 12 и развернуты относительно оси вращения одна от другой на угол 180° , при этом рабочие поверхности периферийных лопаток наклонены под углом $\alpha=30...35^{\circ}$ к плоскости, параллельной оси вала, и образуют прерывистую винтовую линию в прямом направлении, а рабочие поверхности внутренних лопаток наклонены под углом $\beta=120...125^{\circ}$ к плоскости, параллельной оси вала, и образуют прерывистую винтовую линию в обратном направлении. Оси смежных лопастей одноименного направления винтовой линии расположены одна относительно другой под углом 90° и установлены с шагом, равным $0,32...0,48$ радиуса внутренней поверхности

цилиндрического корпуса. Высота периферийных лопаток равна 0,2...0,3 радиуса рабочей поверхности корпуса, а отношение ширины внутренних лопаток к ширине периферийных лопаток составляет 1,5...1,75. По ходу закручивания каждой прерывистой винтовой линии у торцов корпуса 1 смесителя установлены отбойные лопатки 13 и 14, имеющие те же геометрические параметры, что и основные лопатки, и развернуты на угол 180° .

Каждая внутренняя лопатка может быть выполнена в виде части кольца или в виде части винтовой линии.

Стойки 6 и 9 имеют прямоугольную форму, и их рабочие поверхности, контактирующие с перемешиваемой смесью, наклонены под углом $\alpha = 30...35^{\circ}$ к плоскости, параллельной оси вала, и образуют прерывистую винтовую линию в том же направлении, что и внутренние лопатки.

Лопастной смеситель принудительного действия соединяется с приводом (на рисунке не показан) при помощи полумуфты 15.

Лопастной смеситель работает следующим образом:

Включается привод смесителя и через загрузочное отверстие 2 во внутрь корпуса 1 подают предварительно отдозированные минеральные материалы и воду. При вращении вала по стрелке, указанной на рисунках 1 и 2, лопасти интенсивно перемешивают смесь, одновременно перемещая её по двум противоположно направленным потокам: в центральной части и по периферии. Под действием внутренних лопаток 11, а также стоек 6 и 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 8 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, что обеспечивает интенсивный массообмен и ускоряет процесс обволакивания минеральных частиц вяжущим.

Вследствие того, что предлагаемый перемешивающий рабочий орган при вращении переводит смесь во взвешенное состояние, возникают следующие эффекты: во-первых уменьшается плотность перемешиваемой цементобетонной смеси, что приводит к уменьшению сил сопротивления на внутренние и центральные лопатки; во-вторых более интенсивно происходит массообмен, увеличивается относительная подвижность минеральных частиц и как результат улучшается обмазка минеральных частиц вяжущим, разрушаются агрегаты из слипшихся частиц, уменьшается продолжительность перемешивания.

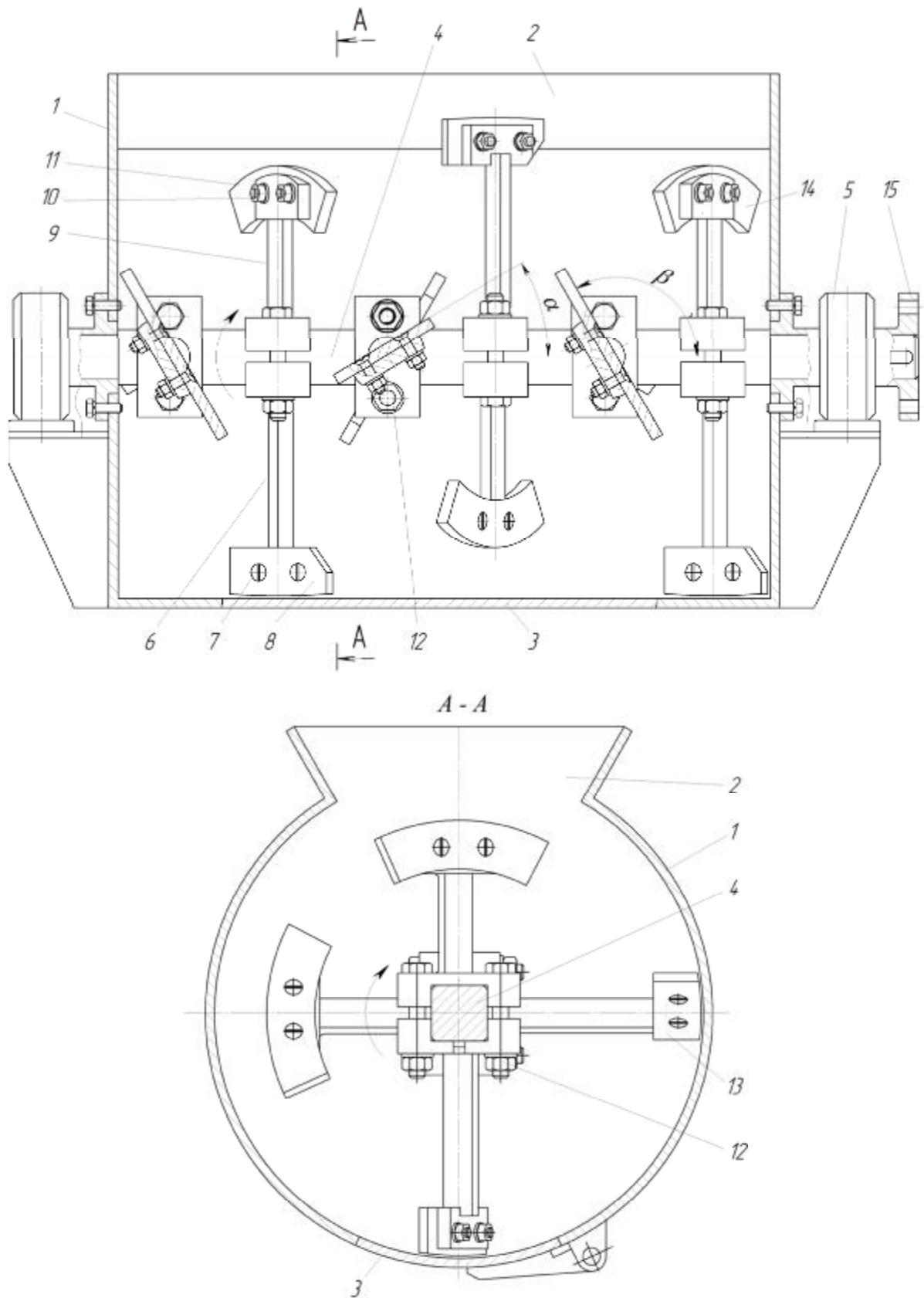


Рис. 1. Общий вид обновляемого бетоносмесителя принудительного действия с переменными формами лопастей

При предлагаемом диапазоне соотношения основных параметров достигается наиболее эффективная работа лопастного смесителя. Закрепление внутренних лопаток под углом $\beta=120\dots125^{\circ}$ к плоскости, параллельной оси вала, является наиболее рациональным, так как при этих значениях угла обеспечивается перевод смеси во взвешенное состояние и завихрение минеральных частиц, что способствует интенсивному перемешиванию, и создается необходимая скорость транспортирования центрального потока.

Закрепление периферийных лопаток под углом $\alpha=30\dots35^{\circ}$ к плоскости, параллельной оси вала, обеспечивает необходимую скорость транспортирования, достаточно интенсивное перемешивание кольцевого потока смеси и минимальные затраты энергии на перемешивание.

При расположении смежных лопастей одноименного направления винтовой линии с шагом, равны $0,32\dots0,48$ радиуса внутренней поверхности цилиндрического корпуса, упрощается конструкция бетоносмесителя за счёт установки минимально необходимого количества лопастей.

Высота периферийных лопаток, равная $0,2\dots0,3$ радиуса рабочей поверхности корпуса, является рациональной, так как при больших значениях возрастают затраты энергии на перемешивание, при меньших значениях уменьшается массообмен между периферийным кольцевым потоком и центральным потоком, что замедляет процесс перемешивания.

При отношении ширины внутренних лопаток к ширине центральных лопаток, равном $1,5\dots1,75$, обеспечивается равномерное распределение смеси по всей зоне перемешивания.

Использование отбойных лопаток 13 и 14 устраняет образование застойных зон в смесителе.

Процесс приготовления цементобетонной смеси разделен на три фазы: сухое перемешивание минеральных компонентов в течении $12 - 15$ с; впрыск воды и полусухое перемешивание в течении $5 - 7$ с и мокрое перемешивание в течении $20 - 25$ с. Весь цикл перемешивания не превышает 45 с.

При открывании заслонки 3 смесь выгружается в транспортное средство.

Коэффициент заполнения лопастного смесителя составляет $0,55\dots0,65$ от всего объема смесителя, что позволяет на $20\dots30\%$ увеличить объём разового замеса. В $1,5\dots2$ раза сокращается продолжительность перемешивания, а следовательно, увеличивается производительность. Также на 25% сокращается установленная мощность привода.

Мощность привода, затрачиваемая на перемешивание бетонной смеси, складывается из нескольких величин: мощности, требуемой на преодоление сил сопротивления перемещению стоек, периферийных и центральных лопаток при медленном вращении лопастного вала;

мощности, расходуемой на преодоление сил трения ядра уплотнения о корпус смесителя, вызываемых инерционными центробежными силами, действующими на ядро уплотнения; мощности, затрачиваемой на сообщение кинетической энергии вращающегося ядра уплотнения бетонной смеси.

На рисунке 2 представлена схема взаимодействия периферийной лопатки с перемешиваемой смесью.

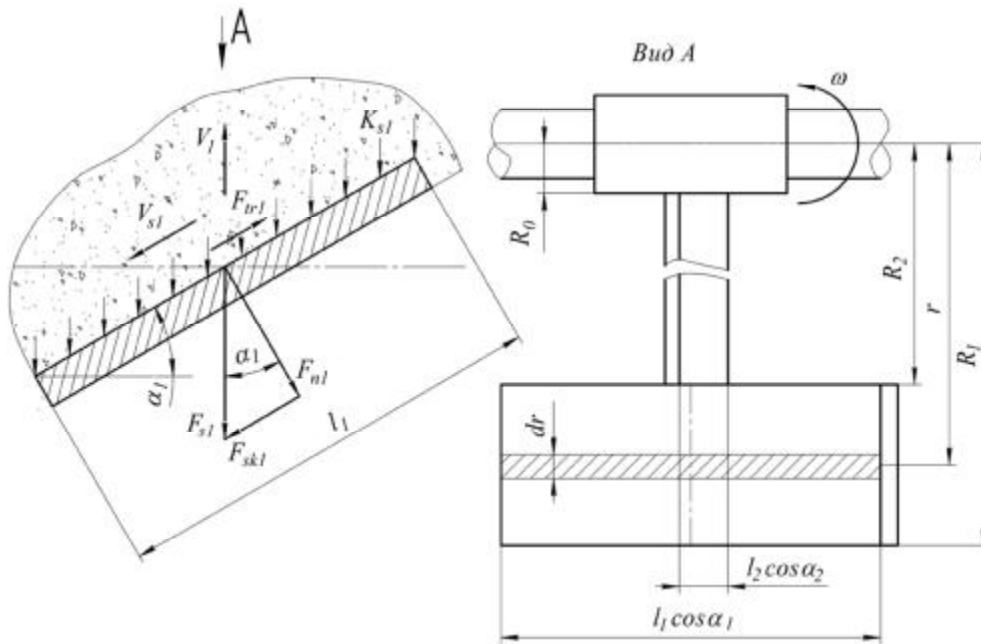


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия периферийной лопатки с перемешиваемой смесью

Величину элементарной силы сопротивления $dF_1(f)$, действующую на выделенную элементарную площадку вращающейся в смеси периферийной лопатки (рис.2), можно найти из зависимости

$$dF_1(f) = K_{s1}(f) l_1 \cos \alpha_1 dr, \quad (1)$$

где $K_{s1}(f)$ – коэффициент сопротивления бетонной смеси на периферийную лопатку, изменяющийся в зависимости от угла поворота лопастного вала f ; l_1 – ширина периферийной лопатки; α_1 – угол наклона периферийной лопатки, $\alpha_1 = 30^\circ$.

Тогда крутящий момент, который необходимо приложить к валу для преодоления сил сопротивления при вращении периферийной лопатки, определим из следующего выражения:

$$T_1(f) = \int_{R_2}^{R_1} dF_1(f) r = \int_{R_2}^{R_1} K_{s1}(f) l_1 r \cos \alpha_1 dr = K_{s1}(f) l_1 \sin \alpha_1 \frac{R_1^2 - R_2^2}{2}, \quad (2)$$

где R_1 и R_2 – радиусы наружной и внутренней кромок периферийной лопатки.

Элементарная работа по преодолению крутящего момента сил лобового сопротивления $T_1(f)$ периферийной лопаткой при повороте лопастного вала на элементарный угол df будет равна

$$dW_1 = T_1(f) \times df = K_{s1}(f) l_1 \cos a_1 \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} df. \quad (3)$$

Используемый в зависимости (3) коэффициент сопротивления бетонной смеси на периферийную лопатку $K_{s1}(f)$ определим из следующего выражения [3]:

$$K_{s1}(f) = K_{s051} \times k_z^2 \times e^{-df^2} \left(1 + \frac{R_1 - 0,5h_1}{R_1} \sin^2 k_1 f \right), \quad (4)$$

где K_{s051} – коэффициент сопротивления перемешиванию смеси при горизонтальном положении периферийной лопатки в момент её входа в бетонную смесь при коэффициенте заполнения корпуса смесителя бетонной смесью $k_{z0} = 0,5$ [3]; k_z – относительный коэффициент загрузки смесителя бетонной смесью, $k_z = V_z / V_{z0}$; V_{z0} – объём перемешиваемой бетонной смеси при коэффициенте заполнения $k_{z0} = 0,5$; V_z – объём перемешиваемой бетонной смеси при коэффициенте заполнения k_{zb} .

Тогда полную работу для преодоления сил лобового сопротивления периферийной лопаткой при её перемещении на участке от $f = 0$ до f_k определим из такого выражения:

$$\begin{aligned} W_1 &= l_1 \cos a_1 \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} \int_0^{f_k} K_{s1}(f) df = \\ &= K_{s051} \times k_z^2 \times l_1 \cos a_1 \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} \int_0^{f_k} e^{-df^2} \left(1 + \frac{R_1 - 0,5h_1}{R_1} \sin^2 k_1 f \right) df. \end{aligned} \quad (5)$$

Представляя функцию e^{-df^2} в виде разложения в ряд Маклорена

$$e^{-df^2} = 1 - \frac{df^2}{1!} + \frac{d^2f^4}{2!} - \frac{d^3f^6}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{d^n f^{2n}}{n!},$$

а функцию $\sin^2 k_1 f$ зависимостью $\sin^2 k_1 f = 0,5(1 - \cos 2k_1 f)$, преобразуем выражение (5) к следующему виду:

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{K_{s051} \times k_z^2 (3R_1 - 0,5h_1)(R_1^2 - R_2^2)}{4R_1} l_1 \cos a_1 \times \int_0^{f_k} \left[1 - \frac{df^2}{1!} + \frac{d^2f^4}{2!} - \right. \\ &- \left. \frac{d^3f^6}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{d^n f^{2n}}{n!} \right] df - \frac{K_{s051} \times k_z^2 (R_1 - 0,5h_1)(R_1^2 - R_2^2)}{2R_1} l_1 \cos a_1 \times \\ &\times \int_0^{f_k} \left[1 - \frac{df^2}{1!} + \frac{d^2f^4}{2!} - \frac{d^3f^6}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{d^n f^{2n}}{n!} \right] \cos 2k_1 f df. \end{aligned} \quad (6)$$

Интегрируя выражение (6), получим:

$$\begin{aligned}
W_1 = & \frac{K_{s051} \times k_z^2 (3R_1 - 0,5h)(R_1^2 - R_2^2)}{4R_1} l_1 \cos a_1 \times \int_k^{\dot{e}} \frac{df^3}{1 \times 3} + \frac{df^5}{2 \times 5} - \\
& - \frac{df^7}{3 \times 7} + K + (-1)^n \frac{d^n f^{2n+1}}{n!(2m+1)} \dot{u} - \\
& - \frac{K_{s051} \times k_z^2 (R_1 - 0,5h)(R_1^2 - R_2^2)}{4R_1} l_1 \cos a_1 \cdot \\
& \cdot \int_k^{\dot{e}} (1 + |l_2 - l_3| + K + (-1)^n) \dot{u}, \quad (7)
\end{aligned}$$

где $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ – определенные интегралы, полученные в работе [3].

Анализ выражений (5) и (6) показывает, что для инженерных расчётов энергии, затрачиваемой на преодоление крутящего момента сил лобового сопротивления бетонной смеси перемешиванию периферийной лопаткой при повороте лопастного вала от $f=0$ до f_k , достаточно ограничиться первыми четырьмя членами подинтегральных выражений зависимости (7), т.е.

$$\begin{aligned}
W_1 = & \frac{K_{s051} \times k_z^2 (R_1^2 - R_2^2)}{4R_1} l_1 \cos a_1 \int_k^{\dot{e}} (3R_1 - 0,5h) \frac{df^3}{1 \times 3} + \frac{df^5}{2 \times 5} - \\
& - \frac{df^7}{3 \times 7} + (R_1 - 0,5h)(1 + |l_2 - l_3|) \dot{u}. \quad (8)
\end{aligned}$$

Скольжение смеси вдоль периферийной лопатки будет происходить в том случае, если скатывающая сила F_{sk1} будет превышать силу трения F_{tr1} , т.е.

$$F_{sk1} > F_{tr1} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} a_1 > f_1, \quad (9)$$

где f_1 – коэффициент трения смеси о рабочую поверхность периферийной лопатки.

С целью определения энергии, затрачиваемой на преодоление сил трения ядра уплотнения о корпус смесителя от действия инерционных центробежных сил на ядро уплотнения, рассмотрим расчётную схему, представленную на рисунке 3. Для определения центробежных сил инерции условно разобьём ядро уплотнения ABC на три объёма: АДС, представляющего в поперечном сечении полусегмент круга; ДЕС, поперечным сечением которого является прямоугольный треугольник; ДВЕ, силой инерции которого можно пренебречь из-за его малости.

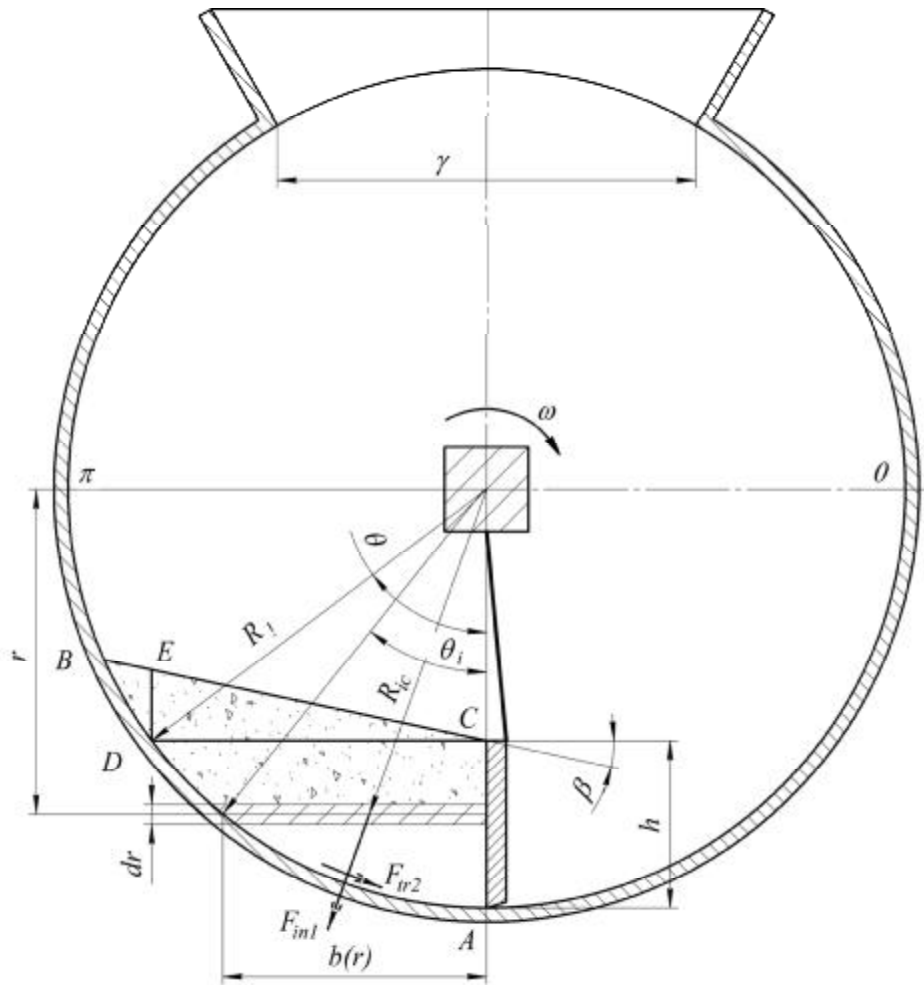


Рис. 3. Расчётная схема для определения сил трения от действия сил инерции на ядро уплотнения бетонной смеси

Величину элементарной силы инерции dF_{in1} , действующей на выделенный элементарный объём общего объёма АДС плотностью γ_1 (рис.3), можно определить из такой зависимости:

$$dF_{in1} = dm_1 R_{ic} \omega^2 = \gamma_1 b(r) R_{ic} \omega^2 l_1 \cos \alpha_1 dr, \quad (10)$$

где dm_1 – масса выделенного элементарного объёма бетонной смеси ядра уплотнения; $b(r)$ – ширина выделенного участка; ω – угловая скорость вращения лопастного вала; R_{ic} – радиус вращения центра масс выделенного объёма ядра уплотнения бетонной смеси,

$$R_{ic} = \sqrt{r^2 + 0,25b^2(r)}; \quad (11)$$

r – радиус вращения места контакта лопатки с выделенным объёмом ядра уплотнения бетонной смеси.

Введём в выражение (10) новую переменную – угол α_i (рис.3.); тогда

$$r = R_1 \cos \alpha_i; \quad dr = -R_1 \sin \alpha_i d\alpha_i; \quad b(r) = R_1 \sin \alpha_i; \quad (12)$$

$$R_{ic} = R_1 \sqrt{\cos^2 \alpha_i + 0,25 \sin^2 \alpha_i}. \quad (13)$$

Вместо трансцендентной функции (13), для определения радиуса вращения центра масс выделенного объема ядра уплотнения в первом приближении можно использовать следующую зависимость:

$$R_{ic} = r \cos \frac{q_i}{2} = R_1 \cos q_i \cos \frac{q_i}{2}. \quad (14)$$

Расхождение значений R_{ic} , вычисленных по формулам (13) и (14) для рассматриваемых значений высоты лопатки h и радиуса обечайки R_1 , в среднем не превышает 2...3%.

Подставляя выражения (12) и (14) в зависимость (10), получим

$$\begin{aligned} dF_{in1} &= dm_i R_{ic} w^2 = -r_1 R_1^3 w^2 l_1 \cos a_1 \sin^2 q_i \cos q_i \cos \frac{q_i}{2} dq_i = \\ &= -4r_1 R_1^3 w^2 l_1 \cos a_1 \frac{\ddot{q}_i}{g} \sin^2 \frac{q_i}{2} \cos^5 \frac{q_i}{2} - \sin^4 \frac{q_i}{2} \cos^3 \frac{q_i}{2} \frac{\ddot{q}_i}{\varnothing} dq_i. \end{aligned} \quad (15)$$

Интегрируя выражение (15), определим силу инерции массы ядра уплотнения, заключенной в объеме АДС:

$$\begin{aligned} F_{in1} &= -4r_1 R_1^3 w^2 l_1 \cos a_1 \frac{\ddot{q}_i}{g} \sin^2 \frac{q_i}{2} \cos^5 \frac{q_i}{2} - \sin^4 \frac{q_i}{2} \cos^3 \frac{q_i}{2} \frac{\ddot{q}_i}{\varnothing} dq_i = \\ &= \frac{4}{7} r_1 R_1^3 w^2 l_1 \cos a_1 \sin \frac{q_i}{2} \frac{\dot{q}_i}{g} \cos^2 \frac{q_i}{2} \frac{\ddot{q}_i}{g} \cos^4 \frac{q_i}{2} + \sin^4 \frac{q_i}{2} \frac{\ddot{q}_i}{\varnothing} + \\ &+ 0,2 \frac{\ddot{q}_i}{g} \sin^4 \frac{q_i}{2} - \cos^4 \frac{q_i}{2} - 4 \frac{\ddot{q}_i}{\varnothing} + \frac{4}{15} \sin^2 \frac{q_i}{2} \frac{\dot{q}_i}{g}. \end{aligned} \quad (16)$$

Используемый в выражении (16) и показанный на рисунке 3 угол q может быть определен из следующей зависимости:

$$q = \arccos \frac{R_1 - h}{R_1} = \arccos \frac{R_2}{R_1}. \quad (17)$$

Центробежную силу инерции, действующую на массу второго выделенного объема ядра уплотнения ДЕС, определим из такого выражения:

$$F_{in2} = \frac{1}{2} R_1^3 w^2 l_1 r \sqrt{\frac{4}{9} + \frac{\ddot{q}_i}{g} \operatorname{ctg} q - \frac{1}{3} \operatorname{tg} b \frac{\ddot{q}_i}{\varnothing}} \cos a_1 \operatorname{tg} b \sin^3 q. \quad (18)$$

На основании полученных зависимостей (16) и (18) определим работу, необходимую для преодоления сил трения ядра уплотнения об обечайку корпуса смесителя, вызванную действием сил инерции, т.е.

$$W_2 = (F_{in1} + F_{in2}) R_1 f_1 \frac{\ddot{q}_i}{g} \rho - \frac{\ddot{q}_i}{\varnothing}. \quad (19)$$

Кинетическая энергия для перемещения ядра уплотнения в свободной зоне перемешивания может быть определена на основании известной зависимости для определения кинетической энергии движущегося тела

$$W_3 = J_b \frac{w^2}{2} \times \frac{\rho + g}{4\rho}, \quad (20)$$

где J_b – момент инерции ядра уплотнения бетонной смеси.

Используя расчётную схему, представленную на рисунке 3, последовательно определим момент инерции массы ядра уплотнения, заключенной в объёмах АДС и ДЕС.

Величину элементарного момента инерции dJ_{b1} массы выделенного элементарного объёма из общей массы объёма АДС (рис.3) определим из следующей зависимости:

$$dJ_{b1} = dm_i R_{ic}^2 = r_1 b(r) R_{ic}^2 l_1 \cos a_1 dr. \quad (21)$$

Подставляя выражения (12) и (13) в зависимость (3.21), получим

$$dJ_{b1} = -r_1 R_1^4 l_1 \cos a_1 \sin^2 q_i (\cos^2 q_i + 0,25 \sin^2 q_i) dq_i. \quad (22)$$

Интегрируя выражение (22), определим момент инерции массы ядра уплотнения, заключенной в объёме АДС:

$$\begin{aligned} J_{b1} &= -r_1 R_1^4 l_1 \cos a_1 \int_0^q \sin^2 q_i (\cos^2 q_i + 0,25 \sin^2 q_i) dq_i = \\ &= r_1 R_1^4 l_1 \cos a_1 \frac{2 \sin 2q + 0,75 \sin 4q - 7q}{32}. \end{aligned} \quad (23)$$

Момент инерции массы ядра уплотнения, заключенной в объёме ДЕС, определим из такого выражения:

$$J_{b2} = \frac{1}{2} r R_1^4 l_1 \frac{\dot{\epsilon}^4}{\epsilon^9} + \frac{\alpha}{\epsilon} \operatorname{ctg} q - \frac{1}{3} \operatorname{tg} b \frac{\ddot{\sigma}^2 \dot{u}}{\dot{\sigma} \dot{u}} \dot{u} \cos a_1 \operatorname{tg} b \sin^4 q. \quad (24)$$

Общий момент инерции ядра уплотнения будет равен

$$J_b = J_{b1} + J_{b2}. \quad (25)$$

Последовательно подставляя полученные выражения (23) и (24) в (25) и далее в формулу (20), определим затраты энергии на сообщение вращательного движения ядра уплотнения бетонной смеси в свободной зоне перемешивания

$$\begin{aligned} W_3 &= \frac{1}{2} r R_1^4 l_1 w^2 \cos a_1 \times \frac{p+g}{4p} \int_1^p \frac{2 \sin 2q + 0,75 \sin 4q - 7q}{32} + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\dot{\epsilon}^4}{\epsilon^9} + \frac{\alpha}{\epsilon} \operatorname{ctg} q - \frac{1}{3} \operatorname{tg} b \frac{\ddot{\sigma}^2 \dot{u}}{\dot{\sigma} \dot{u}} \dot{u} \operatorname{tg} b \sin^4 q \dot{q}. \end{aligned} \quad (26)$$

На рисунке 4 представлена схема взаимодействия внутренней лопатки с перемешиваемой смесью.

Величина элементарной силы сопротивления $dF_2(f)$, действующая на выделенную элементарную площадку вращающейся в смеси внутренней лопатки (рис.4), может быть найдена из зависимости

$$dF_2(f) = K_{s2}(f) r y \cos a_2 dr, \quad (27)$$

где $K_{s2}(f)$ – коэффициент сопротивления бетонной смеси на внутреннюю лопатку, изменяющийся в зависимости от угла поворота лопастного вала f ; r – радиус от оси вращения лопастного вала до

выделенной элементарной площадки на внутренней лопатке; γ – центральный угол; α_2 – угол наклона внутренней лопатки.

Тогда крутящий момент, который необходимо приложить к лопастному валу для преодоления сил сопротивления бетонной смеси, возникающих при вращении внутренней лопатки, определим из следующего выражения:

$$T_2(f) = \int_{R_4}^{R_3} dF_2(f) r = \int_{R_4}^{R_3} K_{s2}(f) r^2 \gamma \sin \alpha_2 dr = K_{s2}(f) \gamma \cos \alpha_2 \frac{R_3^3 - R_4^3}{3}, \quad (28)$$

где R_3 и R_4 – радиусы наружной и внутренней кромок внутренней лопатки.

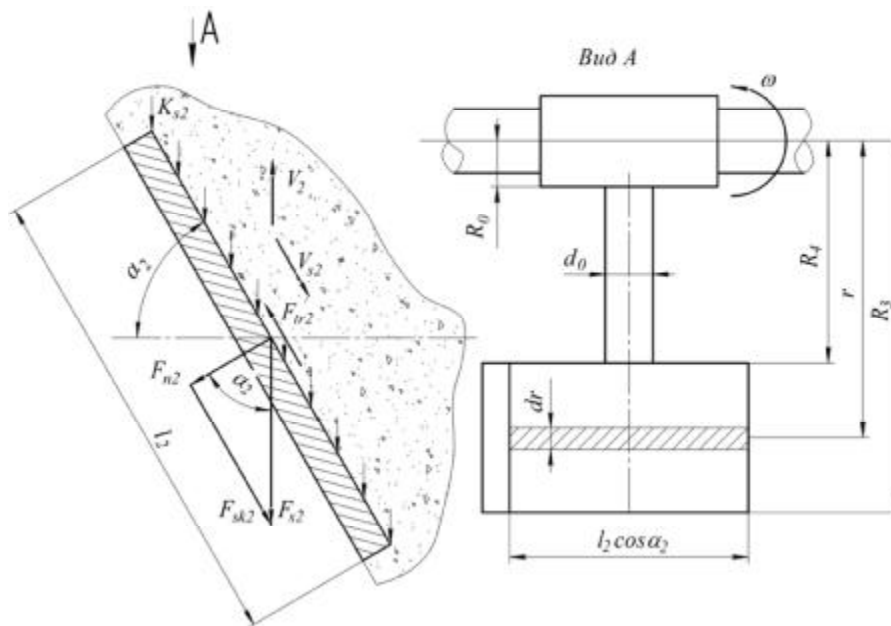


Рис. 4. Расчётная схема взаимодействия внутренней лопатки с перемешиваемой смесью

Элементарная работа по преодолению крутящего момента сил лобового сопротивления $T_2(f)$ внутренней лопаткой при повороте лопастного вала на элементарный угол df будет равна

$$dW_4 = T_2(f) \times df = K_{s2}(f) \gamma \cos \alpha_2 \frac{R_3^3 - R_4^3}{3} df. \quad (29)$$

Используемый в зависимости (29) коэффициент сопротивления бетонной смеси на периферийную лопатку $K_{s2}(f)$ определим из такого выражения:

$$K_{s2}(f) = K_{s052} \times k_z^2 \times e^{-df^2 \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}}} + \frac{0,5(R_3 + R_4)}{R_3} \sin^2 k_1 f \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}}, \quad (30)$$

где K_{s052} – коэффициент сопротивления перемешиванию смеси при горизонтальном положении внутренней лопатки в момент ее входа в

бетонную смесь при коэффициенте заполнения корпуса смесителя бетонной смесью $k_{z0}=0,5$.

Тогда полную работу для преодоления сил лобового сопротивления внутренней лопаткой при её перемещении на участке от $f=0$ до f_k определим из следующего выражения:

$$W_4 = \frac{R_3^3 - R_4^3}{3} y \cos a_2 \int_0^{f_k} K_{s,2}(f) df =$$

$$= K_{s,052} \times k_z^2 \frac{R_3^3 - R_4^3}{3} y \cos a_2 \int_0^{f_k} \left(1 + \frac{0,5(R_3 + R_4)}{R_3} \sin^2 k_1 f\right) df. \quad (31)$$

Используя ранее изложенный метод преобразования функций e^{-df^2} и $\sin^2 k_1 f$, приведем выражение (31) к следующему виду:

$$W_4 = \frac{K_{s,052} \times k_z^2 (5R_3 + R_4)(R_3^3 - R_4^3)}{12R_3} y \cos a_2 \times \int_0^{f_k} \left(1 - \frac{df^2}{1!} + \frac{df^4}{2!} - \frac{df^6}{3!} + K + (-1)^n \frac{df^{2n}}{n!}\right) df -$$

$$\frac{K_{s,052} \times k_z^2 (R_3 + R_4)(R_3^3 - R_4^3)}{6R_3} y \cos a_2 \times \int_0^{f_k} \left(1 - \frac{df^2}{1!} + \frac{df^4}{2!} - \frac{df^6}{3!} + K + (-1)^n \frac{df^{2n}}{n!}\right) \cos 2k_1 f df. \quad (32)$$

Интегрируя выражение (32), получим:

$$W_4 = \frac{K_{s,052} \times k_z^2 (5R_3 + R_4)(R_3^3 - R_4^3)}{12R_3} y \cos a_2 \times \left[\int_0^{f_k} e^{-df^2} - \frac{df^3}{1! \times 3} + \frac{df^5}{2! \times 5} - \frac{df^7}{3! \times 7} + K + (-1)^n \frac{df^{2n+1}}{n!(2n+1)} \right] -$$

$$\frac{K_{s,052} \times k_z^2 (R_3 + R_4)(R_3^3 - R_4^3)}{12R_3} y \cos a_2 \times \left[\int_0^{f_k} e^{-df^2} - \frac{df^3}{1! \times 3} + \frac{df^5}{2! \times 5} - \frac{df^7}{3! \times 7} + K + (-1)^n \frac{df^{2n+1}}{n!(2n+1)} \right], \quad (33)$$

где $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ – определенные интегралы, представленные в работе [3].

Произведенными расчётами было установлено, что при определении энергии, затрачиваемой на преодоление крутящего момента сил лобового сопротивления бетонной смеси перемешиванию внутренней лопаткой при повороте лопастного вала от $f=0$ до f_k , достаточно ограничиться первыми четырьмя членами подынтегральных выражений зависимости (33), т. е.

$$W_4 = \frac{K_{s,052} \times k_z^2 (R_3^3 - R_4^3)}{12R_1} y \cos a_2 \times \left[\int_0^{f_k} e^{-df^2} (5R_3 + R_4) \left(1 - \frac{df^2}{1! \times 3} + \frac{df^4}{2! \times 5} - \frac{df^6}{3! \times 7} + K + (-1)^n \frac{df^{2n+1}}{n!(2n+1)}\right) \right]$$

$$- \frac{d^3 f_k}{3 \sqrt{\varnothing}} + (R_3 + R_4) (| - |_1 + |_2 - |_3) \dot{u} \dot{u} \dot{u} \quad (34)$$

Смещение смеси полностью в продольном направлении будет происходить в том случае, если угол наклона внутренней лопатки будет таким, чтобы смещающая сила F_{sk2} (рис.4) была больше силы трения F_{tr2} , возникающей на поверхности внутренней лопатки от действия нормальной силы F_{n2} , и силы внутреннего трения F_{tr3} , возникающей при смещении одного слоя смеси относительно другого слоя, т.е.

$$F_{sk2} > F_{tr2} + F_{tr3} \quad \text{или} \quad F_{s2} \sin a_2 > F_{s2} \cos a_2 f_1 + F_{s2} \cos a_2 f_2, \quad (35)$$

откуда

$$\operatorname{tg} a_2 > f_1 + f_2. \quad (36)$$

Условие (36) будет выполнено, если угол a_2 будет не меньше 60° . Проведенными исследованиями было установлено, что именно при $a_2 = 60^\circ$ обеспечивается существенное снижение лобового сопротивления, действующего на внутреннюю лопатку со стороны смеси при одновременном эффективном перемешивании смеси.

Используя ранее изложенную методику, определим затраты энергии на преодоление сил лобового сопротивления бетонной смеси перемешиванию стойками, на которых закреплены периферийные и внутренние лопатки при повороте лопастного вала от $f = 0$ до f_k :

$$W_5 = \frac{K_{s053} \times K_z^2 (R_2^2 - R_0^2)}{8R_2} l_2 \cos a_2 \dot{e} \dot{e} \dot{e} (5R_2 + R_0) \dot{e} \dot{e} \dot{e} - \frac{d^3 f_k}{3 \sqrt{\varnothing}} + (R_2 + R_0) (| - |_1 + |_2 - |_3) \dot{u} \dot{u} \dot{u} \quad (37)$$

$$W_6 = \frac{K_{s053} \times K_z^2 (R_4^2 - R_0^2)}{8R_2} l_2 \cos a_2 \dot{e} \dot{e} \dot{e} (5R_4 + R_0) \dot{e} \dot{e} \dot{e} - \frac{d^3 f_k}{3 \sqrt{\varnothing}} + (R_4 + R_0) (| - |_1 + |_2 - |_3) \dot{u} \dot{u} \dot{u}, \quad (38)$$

где W_5 и W_6 – затраты энергии на преодоления сил сопротивления стойками, на которых закреплены периферийные и внутренние лопатки соответственно; K_{s053} – коэффициент сопротивления перемешиванию смеси при горизонтальном положении стоек лопаток в момент их входа в бетонную смесь при коэффициенте заполнения корпуса смесителя бетонной смесью $k_{zб0} = 0,5$.

Полная энергия, затрачиваемая на перемешивание смеси всеми лопастями смесителя за один оборот лопастного вала, будет равна

$$\dot{a} W = z_1(W_1 + W_2 + W_3 + W_5) + z_2(W_4 + W_6), \quad (39)$$

где z_1 – количество лопастей с периферийными лопатками; z_2 – количество лопастей с внутренними лопатками.

Используя зависимость (39), определим расчетную мощность электродвигателя привода одновального бетоносмесителя принудительного действия,

$$P = z_r \frac{\dot{a} W w}{2ph}, \quad (40)$$

где h – коэффициент полезного действия привода; z_r – коэффициент, учитывающий затраты энергии на дробление материала в процессе перемешивания и его заклинивание, $z_r = 1,02 - 1,05$.

Выводы из данного исследования

Впервые теоретическим путем определены силы сопротивления, возникающие при перемешивании смеси в одновальных бетоносмесителях принудительного действия в зависимости от основных параметров смесителя, конструкции рабочих органов, физико-механических характеристик бетонной смеси, особенностей нарастания нагрузки и угловой частоты вращения лопастного вала. Определена мощность привода одновальных бетоносмесителей с переменной формой лопастей.

Литература

1. Морозов М.К. *Механическое оборудование заводов сборного железобетона.* – К.: Высшая школа. Главное изд-во, 1986. – 311 с.
2. 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.
3. Маслов А.Г., Саленко Ю.С. *Определение коэффициента сопротивления перемешиванию бетонной смеси в смесителе принудительного действия // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Вип. 3/2011 (68), част. 1.* – Кременчук: КрНУ, 2011. – С. 96–101.

Надійшла до редакції 20.11.2012

© А. Г. Маслов, Ю. С. Саленко

УДК 693.95(075.8)

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

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОВАЛЬНОГО БЕТОНОЗМІШУВАЧА ІЗ ЗМІННОЮ ФОРМОЮ ЛОПАТЕЙ

Описано конструкцію і принцип дії одновального бетонозмішувача примусової дії, оснащеного лопатями із змінною формою. Складено розрахункові схеми і визначено сили опору, що діють на лопаті змішувача в процесі приготування бетонних сумішей. Установлено закономірності зміни енергоємності процесу перемішування бетонної суміші залежно від радіуса обичайки корпусу змішувача, висоти лопатей, консистенції суміші, внутрішнього коефіцієнта тертя й коефіцієнта тертя суміші об стінки корпусу змішувача, коефіцієнта заповнення сумішшю корпусу змішувача.

Ключові слова: *змішувач примусової дії, бетонні суміші, коефіцієнт опору.*

UDC 693.95(075.8)

*A.Maslov, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Yu.Salenko, Ph. D., Associate Professor*

Kremenchug National University named after Michael Ostrogradskiy

THEORETICAL STUDIES WITH ONE SHAFT CONCRETE MIXER WITH VARIABLE FORMBLADES

The design and principle of operation single-shaft concrete mixer enforcement action with blades with variable shape. Composed design diagram and determined resistance forces acting on the blades of the mixer in the preparation of concrete mixes. The regularities of changes in the intensity of the mixing process of concrete mixture, depending on the radius of the shell of the mixer, the height of the blades, consistency, coefficient of internal friction and friction coefficient of the mixture on the walls of the housing of the mixer, the fill factor of the housing of the mixer mix.

Keywords: *the mixer of forced action concrete mixtures, the coefficient of resistance.*