

УДК 693.95(075.8)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЮ
БЕТОННОЙ СМЕСИ В СМЕСИТЕЛЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ**

А. Г. Маслов, Ю. С. Саленко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, м. Кременчуг, Украина. E-mail: maslov@kdu.edu.ua

Определены коэффициенты сопротивления перемешиванию жестких бетонных смесей в смесителе принудительного действия при медленном вращении лопастного вала. Установлены закономерности изменения коэффициента сопротивления бетонной смеси в зависимости от угла поворота лопастного вала, консистенции смеси и коэффициента трения смеси о стенки корпуса смесителя.

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

**DETERMINATION OF RESISTANCE COEFFICIENT TO INTERFUSION
CONCRETE MIXTURE IN MIXER OF FORCED ACTION**

A. G. Maslov, Yu. S. Salenko

Kremenchuk Michailo Ostrogradsky National University
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine. E-mail: maslov@kdu.edu.ua

Resistance coefficients are definite to interfusion of hard concrete mixtures in mixer of forced action in case of slow rotation of blade billow. Be set to conformity to the law of change of coefficient of resistance of concrete mixture depending on corner of turn of blade billow, consistency of mixture and mixture friction coefficient at the mixer corps walls.

Key words: mixer of forced action, concrete mixtures, resistance coefficient.

**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЕНТА ОПОРУ ПЕРЕМІШУВАННЮ
БЕТОННОЇ СУМІШІ В ЗМІШУВАЧІ ПРИМУСОВОЇ ДІЇ**

О. Г. Маслов, Ю. С. Саленко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: maslov@kdu.edu.ua

Визначені коефіцієнти опору перемішуванню жорстких бетонних сумішей в змішувачі примусової дії при повільному обертанні лопатевого вала. Встановлені закономірності зміни коефіцієнта опору бетонної суміші залежно від кута повороту лопатевого вала, консистенції суміші і коефіцієнта тертя суміші об стіни корпусу змішувача.

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

АКТУАЛЬНОСТЬ РОБОТЫ. Создание бетоно-смесителей принудительного действия, 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. При этом значительное влияние в разработке бетоносмесителей нового класса оказывает внедрение в процесс перемешивания новых эффектов, обеспечивающих повышение качества приготовления жестких и сверхжестких бетонных смесей с низкой энергоемкостью. В тоже время, создание принципиально новых эффектов и способов перемешивания, а также разработка принципиально новых конструкций смесителей, удовлетворяющих современному производству, невозможны без точного определения характера изменения сил сопротивления в процессе перемешивания бетонной смеси.

Чаще всего в практике строительства для приготовления пластичных и жестких цементобетонных смесей применяются лопастные бетоносмесители принудительного действия. Для определения сил сопротивления перемешиванию в этих смесителях обычно используют эмпирические и полуэмпирические методы расчетов [1, 2], которые в первом приближении дают удовлетворительные результаты при разработке известных аналогов, но не обеспечивают

необходимой точности при разработке принципиально новых конструкций бетоносмесителей. Коэффициент сопротивления перемешиванию бетонной смеси принимается постоянным и выбирается из диапазона 30...77 кПа, что не позволяет изучить характер изменения сил сопротивления, точно определить основные параметры и обосновать выбор конструкции новых бетоносмесителей. Таким образом, выполненные исследования, направленные на изучение сил сопротивления бетонной смеси на лопатки смесителя, являются актуальными.

Целью работы является исследование характера изменения сил сопротивления перемешиванию бетонной смеси в смесителе принудительного действия при медленном вращении лопастного вала.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Для определения характера изменения сил сопротивления в зависимости от угла поворота медленно вращающегося лопастного вала от нулевого (горизонтально) положения до 180° целесообразно рассмотреть взаимодействие лопатки с цементобетонной смесью через каждые 30°. Медленное вращение лопастного вала принимается для того, чтобы на первом этапе исследований исключить действие инерционных сил. При этом было принято условие, что корпус бетоносмесителя заполнен перемешиваемой смесью полностью до оси

вращения лопастного вала, и поверхность смеси имеет горизонтальное расположение. На рис. 1 представлена расчетная схема взаимодействия прямоугольной лопатки с цементобетонной смесью при горизонтальном положении лопастного вала (нулевом положении). При медленном вращении вала 4 под лопаткой 2 образуется ядро уплотнения ABC в виде сложной призмы, которое также медленно вращается вместе с лопаткой. Ядро уплотнения взаимодействует с окружающей его смесью и обечайкой 1 корпуса смесителя. Геометрические размеры ядра уплотнения

зависят от радиуса обечайки R , высоты и ширины лопатки и угла b , который образован наклонной поверхностью ядра уплотнения и нормалью к поверхности лопатки. Величина угла b зависит от угла внутреннего трения бетонной смеси j_0 и может быть определена из следующей зависимости:

$$b = 0,5(45^\circ - \frac{j_0}{2}). \quad (1)$$

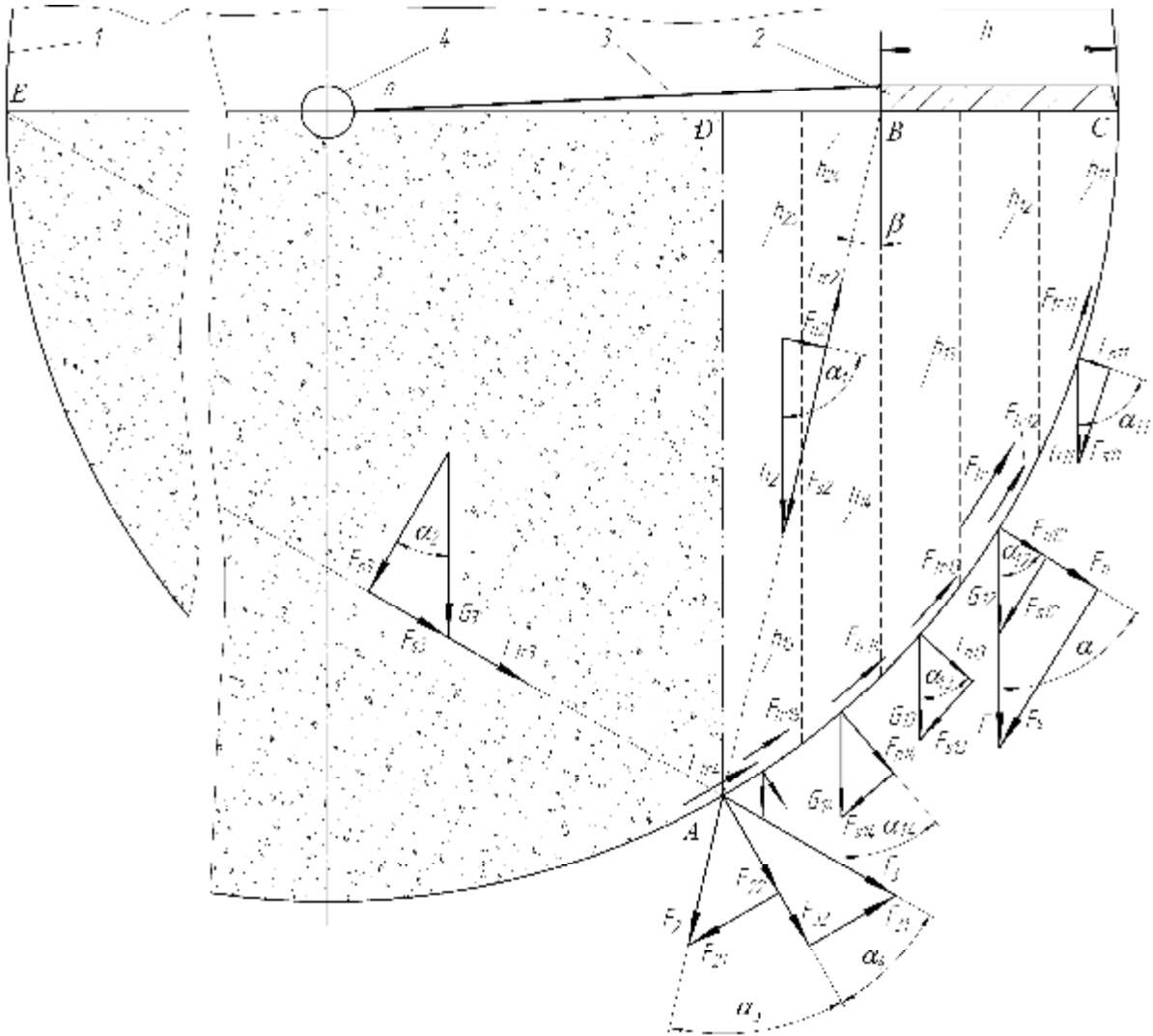


Рисунок 1 – Расчетная схема взаимодействия лопатки со смесью при медленном вращении и нулевом положении лопастного вала:
 1 – обечайка корпуса бетоносмесителя; 2 – лопатка; 3 – стойка;
 4 – лопастной вал; $F_{tr4} = F_{tr41} + F_{tr42}$

На ядро уплотнения будут действовать следующие силы: внешняя движущая сила давления F со стороны лопатки, приложенная в середине лопатки; сила тяжести G_1 ядра уплотнения ABC ; сила тяжести G_2 призмы ADB , действующей на наклонную поверхность AB ; сила тяжести G_3 призмы ADE , действующей на наклонную поверхность AE ; реак-

ция со стороны обечайки от действия движущей силы и сил тяжести ядра уплотнения G_1 , призмы ADB G_2 и призмы ADE G_3 ; силы трения между ядром уплотнения и обечайкой, а также между призмами и наклонными поверхностями.

Величина внешней силы давления F , перемещающей ядро уплотнения, может быть определена из следующего выражения:

$$F = K_s hb, \quad (2)$$

где K_s – коэффициент сопротивления бетонной смеси при перемешивании; h – высота лопатки, b – ширина лопатки.

Сила F создает в бетонной смеси давление, которое в начальной стадии уплотняет ядро ABC , и одновременно передается на обечайку корпуса смесителя. Разложим эту силу на две составляющие:

– силу нормального давления, действующую на обечайку,

$$F_n = F \cos a = K_s hb \cos a; \quad (3)$$

– окружную силу, направленную по касательной к цилиндрической поверхности обечайки корпуса смесителя в месте приложения нормальной силы F_n ,

$$F_t = F \sin a = K_s hbs \sin a, \quad (4)$$

где a – угол между направлением силы F и нормальной силой давления F_n .

Нормальная сила давления F_n вызывает силу трения

$$F_{tr} = F_n f_1 = K_s hb f_1 \cos a, \quad (5)$$

направленную в противоположную сторону от окружной силы F_t .

Здесь f_1 – коэффициент трения ядра уплотнения об обечайку корпуса смесителя.

Для определения сил взаимодействия между ядром уплотнения и обечайкой корпуса смесителя условно разобьем слой перемешиваемой смеси, находящийся в ядре уплотнения ABC и призме ADB , на ряд n элементарных вертикальных объемов одинаковой ширины Δ_l , рис. 1.

Сила тяжести каждого элементарного объема, действующего на обечайку корпуса смесителя, может быть определена на основании следующей зависимости:

$$G_i = \Delta_l (h_{1i} r_1 + h_{2i} r_2) \cdot bg, \quad (6)$$

где r_1 – плотность смеси в ядре уплотнения; r_2 – плотность смеси, находящейся вне ядра уплотнения; h_{1i} – высота i -го элементарного объема ядра уплотнения; h_{2i} – высота i -го элементарного объема призмы ADB , находящегося над i -м элементарным объемом ядра уплотнения; g – ускорение свободного падения.

При определении силы тяжести i -го элементарного объема G_i , находящегося под лопаткой, в формуле (6) высота h_{2i} принимается равной нулю.

Значения h_{1i} и h_{2i} могут быть определены аналитически или при помощи графических построений.

Силу тяжести i -го элементарного объема G_i разложим на две составляющие: силу нормального давления F_{nli} , действующую на обечайку, и окруж-

ную силу F_{sli} , направленную по касательной к нормальной силе F_{nli} , т.е.,

$$F_{nli} = \Delta_l (h_{1i} r_1 + h_{2i} r_2) \cdot bg \cos a_{li}; \quad (7)$$

$$F_{sli} = \Delta_l (h_{1i} r_1 + h_{2i} r_2) \cdot bg \sin a_{li}, \quad (8)$$

где a_{li} – угол между направлением силы тяжести G_i и нормальной силой давления F_{nli} .

Нормальная сила давления i -го элементарного объема на обечайку корпуса смесителя вызывает силу трения F_{trli} :

$$F_{trli} = \Delta_l (h_{1i} r_1 + h_{2i} r_2) \cdot bg f_1 \cos a_{li}. \quad (9)$$

Эта сила направлена по касательной к цилиндрической поверхности обечайки корпуса смесителя в противоположную сторону относительно направления вращения ядра уплотнения.

Суммарные силы сопротивления элементарных сил F_{sli} и F_{trli} будут иметь следующий вид:

$$F_{s1} = \Delta_l bg \sum_{i=1}^{i=n} (h_{1i} r_1 + h_{2i} r_2) \cdot \sin a_{li}; \quad (10)$$

$$F_{tr1} = \Delta_l bg f_1 \sum_{i=1}^{i=n} (h_{1i} r_1 + h_{2i} r_2) \cdot \cos a_{li}, \quad (11)$$

где F_{s1} – суммарная сдвигающая сила, направленная по касательной к обечайке корпуса смесителя; F_{tr1} – суммарная сила трения, направленная по касательной к обечайке корпуса смесителя.

Путем сложения выражений (10) и (11) найдем суммарную силу сопротивления F_1 , действующую по касательной к цилиндрической поверхности обечайки корпуса смесителя:

$$F_1 = \Delta_l bg \sum_{i=1}^{i=n} [(h_{1i} r_1 + h_{2i} r_2) \times (f_1 \cos a_{li} - \sin a_{li})]. \quad (12)$$

Суммарная сила сопротивления F_2 , направленная по линии скольжения AB от действия силы тяжести G_2 призмы ADB , может быть определена из следующего выражения:

$$F_2 = (F_{s2} - F_{n2} f_2) = G_2 (\sin a_1 - f_2 \cos a_1), \quad (13)$$

где F_{s2} – сдвигающая сила, вызванная наклоном поверхности скольжения AB призмы ADB ; F_{n2} – нормальная сила, направленная к поверхности скольжения AB призмы ADB ; f_2 – коэффициент внутреннего трения перемешиваемой смеси; a_1 – угол между направлением силы тяжести G_2 и нормальной силой F_{n2} ;

$$G_2 = 0,5 \cdot AD \cdot DB \cdot b r_2 g. \quad (14)$$

Суммарную силу сопротивления F_2 , действующую на обечайку разложим на две составляющие: силу нормального давления F_{22} , действующую по нормали к обечайке, и окружную силу

F_{21} , направленную по касательной к нормальной силе F_{22} , т.е.,

$$F_{22} = G_2(\sin a_1 - f_2 \cos a_1) \cos a_3; \quad (15)$$

$$F_{21} = G_2(\sin a_1 - f_2 \cos a_1) \sin a_3, \quad (16)$$

где a_2 – угол между направлением силы F_2 и нормальной силой давления F_{22} .

Нормальная сила давления на обечайку корпуса смесителя F_{22} вызывает силу трения F_{tr41} , направленную по касательной к нормальной силе F_{22} :

$$F_{tr41} = G_2(\sin a_1 - f_2 \cos a_1) f_1 \cos a_3. \quad (17)$$

Суммарная сила сопротивления F_3 , направленная по линии скольжения AE от действия силы тяжести G_3 призмы AED , может быть определена из следующего выражения:

$$F_3 = (F_{s3} + F_{n3} f_2) = G_3(\sin a_2 + f_2 \cos a_2), \quad (18)$$

где F_{s3} – сдвигающая сила, вызванная наклоном поверхности скольжения AE призмы AED ; F_{n3} – нормальная сила, направленная к поверхности скольжения AE призмы AED ; a_2 – угол между направлением силы тяжести G_3 и нормальной силой F_{n3} ;

$$G_3 = 0,5 \cdot AD \cdot DE \cdot b \cdot r_2 g. \quad (19)$$

Суммарную силу сопротивления F_3 , разложим на две составляющие: силу нормального давления F_{32} , действующую по нормали к обечайке, и окружную силу F_{31} , направленную по касательной к нормальной силе F_{32} , т.е.,

$$F_{32} = G_3(\sin a_2 + f_2 \cos a_2) \cos a_4; \quad (20)$$

$$F_{31} = G_3(\sin a_2 + f_2 \cos a_2) \sin a_4, \quad (21)$$

где a_4 – угол между направлением силы F_3 и нормальной силой давления F_{32} .

Нормальная сила давления на обечайку корпуса смесителя F_{32} вызывает силу трения F_{tr42} , направленную по касательной к нормальной силе F_{32} :

$$F_{tr42} = G_3(\sin a_2 + f_2 \cos a_2) f_1 \cos a_4. \quad (22)$$

Таким образом, все действующие силы при медленном вращении лопастного вала приведены к силам, касательным к цилиндрической поверхности обечайки корпуса смесителя.

Из равенства суммы моментов всех действующих касательных сил получим следующее уравнение:

$$(F_t - F_{tr})R = (F_1 + F_{tr41} - F_{21} + F_{tr42} + F_{31}). \quad (23)$$

Подставляя в выражение (23) зависимости (4, 5, 12, 16, 17, 21, 22), получим:

$$K_s hb(\sin a - f_1 \cos a) =$$

$$= \Delta_l bg \sum_{i=1}^{i=n} (h_{1i} r_1 + h_{2i} r_2)(f_1 \cos a_{1i} - \sin a_{1i}) + \\ + G_2(\sin a_1 - f_2 \cos a_1)(f_1 \cos a_3 - \sin a_3) + \\ + G_3(\sin a_2 + f_2 \cos a_2)(f_1 \cos a_4 + \sin a_4). \quad (24)$$

Из полученного выражения определим коэффициент сопротивления перемешиванию бетонной смеси при нулевом положении лопастного вала:

$$K_s = \left\{ \Delta_l bg \sum_{i=1}^{i=n} (h_{1i} r_1 + h_{2i} r_2)(f_1 \cos a_{1i} - \sin a_{1i}) + \\ + G_2(\sin a_1 - f_2 \cos a_1)(f_1 \cos a_3 - \sin a_3) + \\ + G_3(\sin a_2 + f_2 \cos a_2)(f_1 \cos a_4 + \sin a_4) / \right. \\ \left. / [hb(\sin a - f_1 \cos a)] \right\}. \quad (25)$$

На рис. 2 представлена расчетная схема взаимодействия прямоугольной лопатки с цементобетонной смесью при повороте лопастного вала от горизонтального положения на 30° .

Для этого и других последовательных положений лопастного вала используются вышеприведенная методика определения коэффициента сопротивления при новых, соответствующих значениях высот элементарных объемов h_{1i} и h_{2i} , элементарных углов a_{1i} , углов $a_1 \dots a_4$, сил тяжести призм G_1 и G_2 . Неизменным остается форма и размеры ядра уплотнения, коэффициенты трения.

При вычислении силы тяжести G_2 призмы, оказывающей давление на поверхность скольжения AB , необходимо из силы тяжести призмы $ADNB$ исключить силу тяжести призмы BNM , учитывающий обрушение смеси по поверхности MB , имеющей наклон к горизонту на угол q .

Здесь q – угол естественного откоса смеси.

На рис. 3 показано изменение коэффициента сопротивления K_s жестких бетонных смесей различных консистенций при повороте лопастного вала от 0 до 180° соответственно при высоте лопаток $h=60$ мм (а) и $h=90$ мм (б). Физико-механические характеристики используемых жестких смесей приведены в табл. 1 Для проведения исследований использовался бетоносмеситель принудительного действия, у которого радиус обечайки корпуса равен $R=300$ мм. Ширина лопатки была принята равной 120 мм. Анализ приведенных данных показывает, что вопреки существующему мнению коэффициент сопротивления бетонной смеси K_s при перемешивании не остается постоянным, а существенно зависит от угла поворота лопастного вала. Значение K_s также зависит от физико-механических характеристик смеси и высоты лопатки лопастного вала. Сухие смеси и бетонные смеси большей жесткости имеют большие значения коэффициента сопротивления K_s . Плот-

ность рыхлой смеси r_2 и плотность ядра уплотнения r_1 не оказывают видимого значения на изменение сил сопротивления перемешиванию смеси. Это объясняется тем, что величина сил сопротивления при перемешивании в большей степени зависит от коэффициента трения смеси по обечайке корпуса смесителя f_1 . Коэффициент внутреннего трения смеси f_2 в меньшей степени влияет на изменение сил сопротив-

ления. При увеличении высоты лопатки с 60 до 90 мм максимальное значение коэффициента сопротивления снижается на 11...18%, т.е. при увеличении высоты лопатки в 1,5 раза общая нагрузка, действующая на лопатку, возрастает не в 1,5 раза, а только в 1,3...1,35 раза. Наибольшие давления, возникающие в результате перемешивания сухих и жестких смесей, лопатки испытывают при вращении в диапазоне от 30 до 75°.

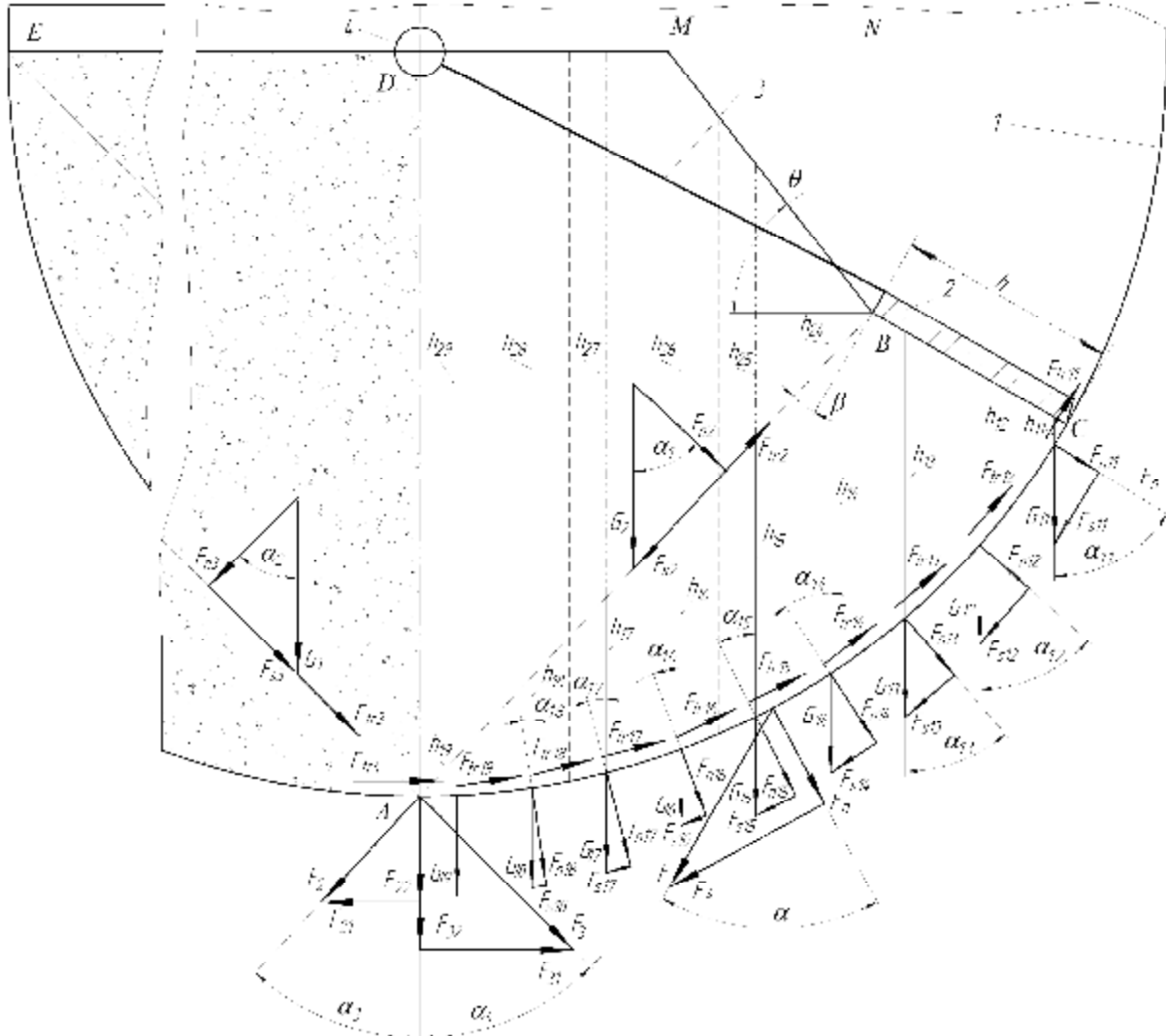


Рисунок 2 – Расчетная схема взаимодействия лопатки со смесью при повороте лопастного вала на угол 30° и медленном его вращении :
 1 – обечайка корпуса бетоносмесителя; 2 – лопатка; 3 – стойка;
 4 – лопастной вал; $F_{tr4} = F_{tr41} + F_{tr42}$

Таблица 1 – Физико-механические характеристики жестких бетонных смесей

Тип жесткой смеси	Физико-механические характеристики смеси			
	Плотность ядра уплотнения, r_1 , кг/м ³	Плотность рыхлой смеси, r_2 , кг/м ³	Коэффициент трения смеси по обечайке, f_1	Внутренний коэффициент трения смеси, f_2
Сухая смесь	1740	1600	0,7	0,8
Ж=120 с	1860	1700	0,6	0,8
Ж=90 с	1980	1800	0,55	0,75
Ж=60 с	2030	1850	0,5	0,7
Ж=30 с	2090	1900	0,45	0,7

Из приведенного анализа следует, что при создании новых типов бетоносмесителей необходимо разработать конструкции перемешивающих рабочих органов, позволяющих значительно уменьшить силы сопротивления при перемещении лопаток в диапазоне от 30 до 75°. С целью удобства проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований полученную зависимость (25) можно представить в виде следующей аппроксимирующей трансцендентной функции:

$$K_s = K_{s0} \cdot e^{-d_j^2} (1 + \sin^2 k_1 j), \quad (26)$$

где $d_1 = a_1 f_1$; a_1 и k_1 – коэффициенты аппроксимации, $a_1 = 0,333$, $k_1 = 1,4$; K_{s0} – коэффициент сопротивления перемешиванию смеси при $j = 0$ (табл. 2).

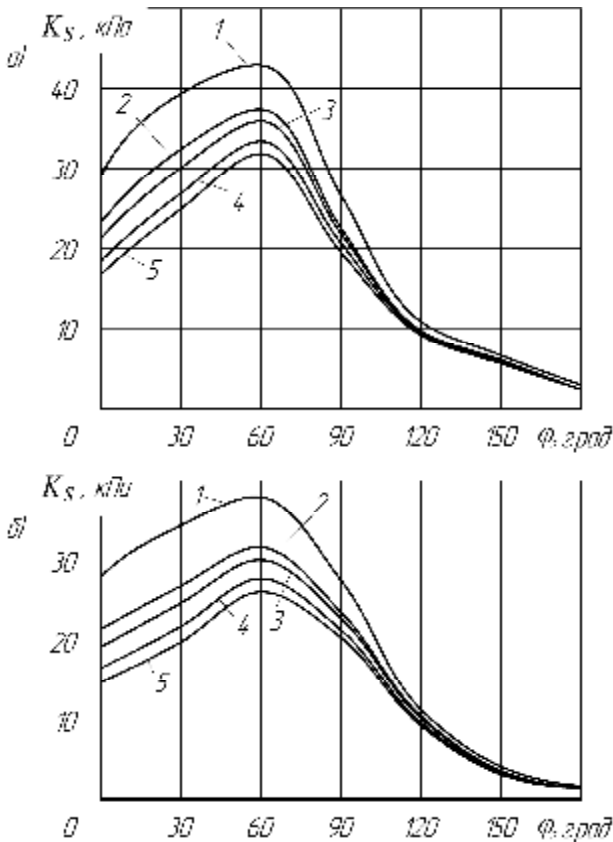


Рисунок 3 – Изменение коэффициента сопротивления K_s бетонной смеси в зависимости от угла поворота лопастного вала при высоте лопатки $h = 60$ мм (а), $h = 90$ мм (б) и различных значениях консистенции бетонной смеси: 1 – при сухом перемешивании смеси; 2 – при жесткости смеси $Ж = 120$ с; 3 – при $Ж = 90$ с; 4 – при $Ж = 60$ с; 5 – при $Ж = 30$ с

Таблица 2 – Значения коэффициента сопротивления K_{s0} при $h = 60$ мм

Тип жесткой смеси	Значение коэффициента сопротивления при $j = 0$, K_{s0} , кПа
Сухая смесь	28,90
$Ж = 120$ с	23,28
$Ж = 90$ с	21,10
$Ж = 60$ с	19,00
$Ж = 30$ с	17,50

На рис. 4 показано изменение коэффициента сопротивления перемешиванию K_s , представленного в виде функции (26). Физико-механические характеристики смесей приведены в табл. 1.

Полученные данные полностью подтверждены результатами экспериментальных исследований, проведенных на бетоносмесителе принудительного действия. Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 7...10%.

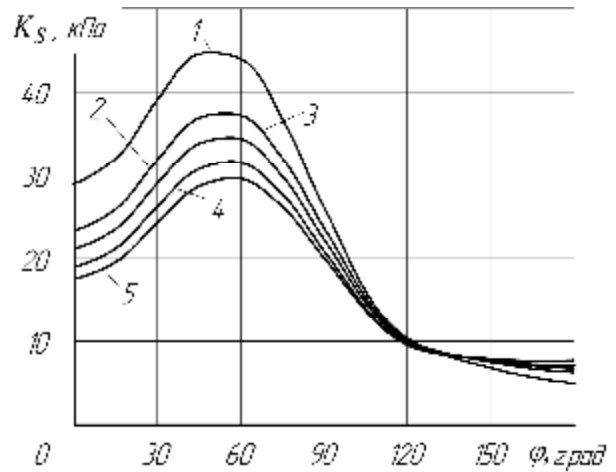


Рисунок 4 – Теоретические кривые изменения коэффициента сопротивления K_s бетонной смеси в зависимости от угла поворота лопастного вала при высоте лопатки $h = 60$ мм: 1 – при сухом перемешивании смеси; 2 – при жесткости смеси $Ж = 120$ с; 3 – при $Ж = 90$ с; 4 – при $Ж = 60$ с; 5 – при $Ж = 30$ с

ВЫВОДЫ. Впервые выявлена закономерность изменения коэффициента сопротивления K_s бетонной смеси в зависимости от угла поворота лопастного вала. Это позволит более точно определять мощность привода бетоносмесителей принудительного действия, а также разработать их принципиально новые конструкции, повысив при этом качество приготавливаемых смесей и уменьшив мощность привода в 1,5...1,8 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов М.К. Механическое оборудование заводов сборного железобетона. – Киев: Вища школа. 1986. – 311 с.
2. Назаренко І.І. Машины для виробництва будівельних матеріалів: Підручник. – К.: КНУБА, 1999. – 488 с.

REFERENCES

1. Morozov M.K. the Mechanical equipment of factories of collapsible reinforced concrete. – Kyiv: High school. 1986. – 311 p. [in Russian].
2. Nazarenko I.I. Machines for production of build materials: Textbook. – K.: KNUBA, 1999. – 488 p. [in Ukrainian].

Стаття надійшла 24.05.2011.
Рекомендована до друку
д.т.н., проф. Солтусом А.П.