

УДК 621.929.2

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СМЕСИТЕЛЕЙ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Несмеянов Н.П., Почупайло Б.И., Дмитриенко В.Г., Бражник Ю.В., Матусов М.Г.

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Белгород, e-mail: beren1989@yandex.ru*

В связи с ростом индивидуального строительства актуальным вопросом в настоящее время является создание высокоэффективного малогабаритного комбинированного смесителя для получения бетонорастворных смесей различного качества. Данная статья посвящена вопросу влияния конструктивных параметров смесителей принудительного действия на эффективность процесса смешивания – качество готовой продукции и энергетические параметры рассматриваемого оборудования. Необходимо отметить, что изменение конструкции рабочего органа циклического смесителя принудительного действия значительно влияет на энергоёмкость процесса перемешивания и на качество получаемой смеси. В первую очередь это зависит от эффективности воздействия на материал лопастей, установленных на роторе смесителя. Предложенная в настоящей статье методика расчета энергетических показателей смесителя с учетом движения смеси по лопасти, движущейся по круговой траектории, показала, что при неизменной ширине и высоте захвата лопасти потребляемая бетоносмесителем мощность зависит от коэффициента полезного действия (КПД) лопасти. При этом повышение КПД лопасти возможно в первую очередь за счет изменения формы устанавливаемых на роторе лопастей. Перспективными в этом направлении являются лопасти геликоидной, желобчатой и других форм.

Ключевые слова: бетон, смеситель, лопасть, ротор, КПД лопасти, энергетические показатели

METHODOLOGY FOR CALCULATING OF RATIONAL PARAMETERS OF WORKING BODIES OF THE FORCED ACTION MIXER

Nesmeyanov N.P., Pochupaylo B.I., Dmitrienko V.G., Brazhnik Y.V., Matusov M.G.

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov,
Belgorod, e-mail: beren1989@yandex.ru*

In connection with the growth of the individual building a topical issue at the moment is to create a highly efficient compact mixer for the combined mix concrete mixtures of different qualities. This article is devoted to the influence of the design parameters of the mixers of forced action on the efficiency of the mixing process – product quality and energy parameters of considered equipment. It should be noted that changing of the working body cyclic structure forced action mixer significantly affect energy consumption of the mixing process and the quality of the resulting mixture. This primarily depends on the efficiency of the impact on the material of the blades mounted on the rotor of the mixer. Proposed in this article method of calculating the energy indicators of of the mixer, taking into account the motion of the mixture of the blades moving in a circular path, it showed that at constant width and height of the capture of the blade, concrete mixer power consumption depends on the coefficient of performance (COP) of the blade. This increase in efficiency of the blade is possible in the first place, by changing the shape of blades mounted on the rotor. Promising in this direction is the blade helicoid, gouging and other forms.

Keywords: concrete, mixer, blade, rotor, blade efficiency, energy performance

В настоящее время значительное расширение строительных работ увеличивает расход современных материалов

Наибольшее распространение получили бетонные смеси с заданными технологическими и эксплуатационными свойствами [8]. Большое количество достоинств – широкая распространенность исходных компонентов, высокая прочность, долговечность, относительно низкая себестоимость, возможность повторной переработки – привело к тому, что бетон в ближайшем будущем будет оставаться самым распространенным строительным материалом.

Основным фактором, обуславливающим работу предприятий по производству бетона и изделий из него, можно считать эффективную эксплуатацию оборудования, а также деятельность по повышению технических

характеристик (производительность, удельная энергоёмкость) оборудования, заложенных при его проектировании [2].

При выборе оптимальной конструкции бетоносмесителя принудительного действия роторного типа необходимо учитывать действие сил на частицу материала, находящегося в кольцевом смесительном пространстве. Это внешние силы от лопасти, меняющиеся по значению и направлению, центробежные силы, силы внутреннего и внешнего трения и силы, обусловленные вязкопластичными свойствами материала. Под воздействием указанных сил зерно материала может перемещаться в направлении вращения лопасти в радиальном направлении, а также опускаться вниз [3].

Примером может служить разработанное устройство [11] для бетоносмесителей

роторного типа, реализующее воздействие рабочего органа на материал в двух взаимно перпендикулярных горизонтальных направлениях, позволяющее интенсифицировать процесс перемешивания и устранения застойных зон смесителя.

Поэтому в основу разработки смесителей данного типа закладываются два основных принципа.

Первый – это когда при движении лопасть смесительного аппарата, воздействуя на смесь, первоначально начинает ее уплотнять. В смеси возникают напряжения, увеличивающиеся по мере перемещения лопасти. При достижении напряжений в смеси, превосходящих силы сопротивления, оказываемые смесью, призма смеси начинает движение относительно прилегающих слоев.

Момент начала относительного движения призмы материала свидетельствует о том, что активные силы превысили силы внешнего и внутреннего трений.

При движении лопасти в смеси ей необходимо преодолеть силы внутреннего и внешнего трения, обусловленные предельными напряжениями сдвига смеси по смеси и смеси по металлу. Первые силы при определении энергетических показателей смесителя на порядок выше, чем вторые.

Второй – это когда лопастной аппарат при вращении должен перемешивать материал не только в направлении движения, но и в радиальном направлении, что достигается путем установки лопастей под определенными углами, которые могут быть как «положительными», так и «отрицательными», в зависимости от направления перемещения смеси [7].

Поэтому в практике конструирования рабочих органов смесителей в виде наклонных плоскостей, установленных на роторе, иногда используется эффект «косого резанья» с целью уменьшения силы сопротивления в заданном направлении движения [4].

Рассмотрим влияние эффекта «косого резанья» на энергетические показатели при движении смеси по лопасти смесителя принудительного действия с горизонтально движущимися лопастями по круговой траектории.

Примем следующие технологические условия: ширина и высота захвата в течение цикла постоянны. Это означает, что при проектировании изменение угла γ установки лопасти влечет за собой необходимость изменения ее геометрических размеров.

При движении бетонной смеси в направлении линии ac , перпендикулярной основанию лопасти (рис. 1, а) сила, действующая на лопасть, и ее КПД определяются так же, как и для любого тела, движущегося вверх по наклонной плоскости [1, 5, 6].

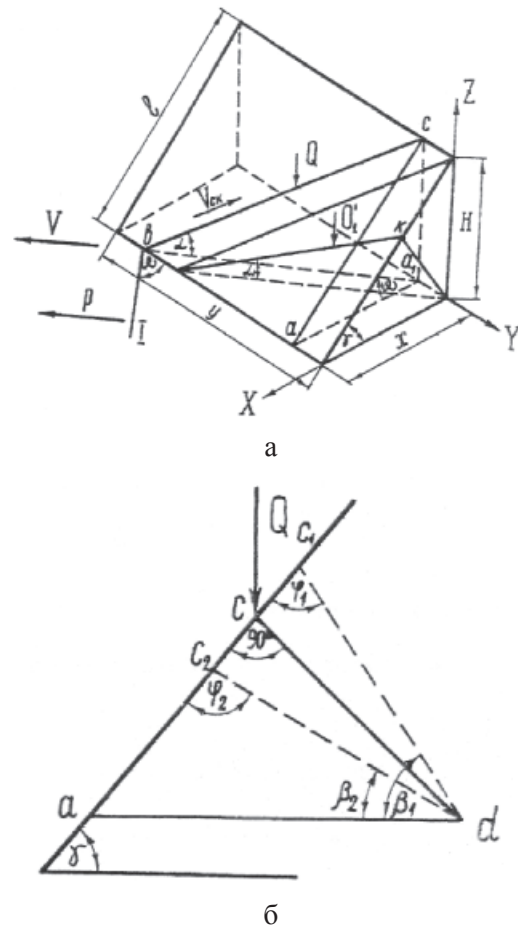


Рис. 1. Расчетная схема сил, действующих на лопасть смесителя

Если лопасть установлена под некоторым углом $90^\circ + \omega$ к направлению движения и находится вблизи поверхности бетона, частица может двигаться вверх, например, по линии b_1c_1 (рис. 2), лежащей в плоскости движения.

Проведем $l_{b_1d_1}$ параллельно вектору скорости движения лопасти, т.е. $l_{b_1d_1} \parallel v$, отрезки $l_{A_1d_1}$ и $l_{b_1d_1}$ взаимно перпендикулярны, т.е. $l_{A_1d_1} \perp l_{b_1d_1}$ и $l_{b_1d_1} \perp I$, линия I – перпендикулярна v . Из этих построений можно получить зависимость

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{H}{l_{b_1d_1}}, \quad (1)$$

где α_1 – угол между направлением скольжения бетонной смеси и горизонтальной плоскостью; γ – угол наклона лопасти; H – проекция лопасти на вертикаль.

То есть

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos \omega,$$

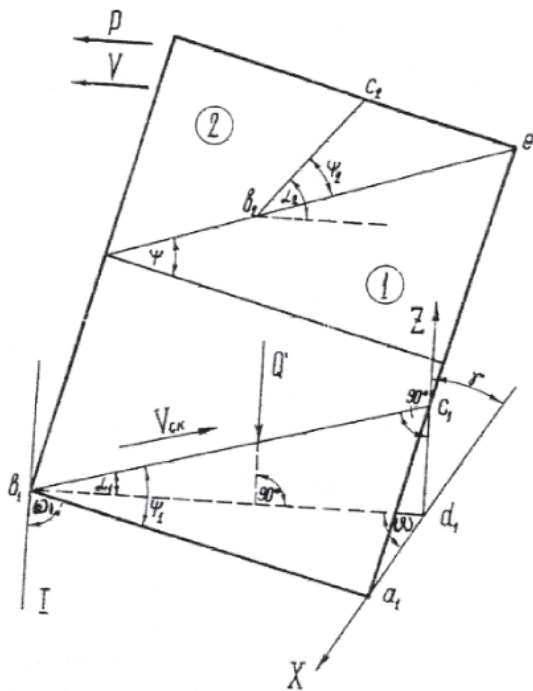


Рис. 2. Расчетная схема для определения энергетических показателей движения смеси вверх по лопасти смесителя

При движении лопасти в перемешиваемой массе должно соблюдаться следующее условие:

$$P \cos \alpha = Q \sin \alpha + Q' f \cos \gamma + P f \sin \alpha, \quad (2)$$

где $Q \cos \gamma$ – сила нормального давления на лопасть; α – угол между траекторией скольжения и ее проекцией.

Из выражения (2) определим усилие, действующее на лопасть:

$$P = \frac{Q(\sin \alpha + f \cos \gamma)}{(\cos \alpha - f \sin \alpha)}, \quad (3)$$

где Q – вес смеси, поднимаемой лопастью; f – коэффициент трения бетонной смеси по стали.

Коэффициент полезного действия лопасти для рассматриваемого случая равен

$$\eta_A = \frac{Q v_c \sin \alpha}{P v_c \cos \alpha} = \frac{\operatorname{tg}(\cos \alpha - f \sin \alpha)}{\sin \alpha + f \cos \gamma}, \quad (4)$$

где v_{ck} – скорость движения бетонной смеси по лопасти.

Математическое описание процесса перемешивания бетонных смесей лопастями, вращающимися в горизонтальной плоскости на вертикальном валу, можно составить на основе баланса относительной мощности, потребляемой лопастью смесителя.

На рис. 3 показана схема процесса перемешивания (а), план скоростей (б) и план сил (в).

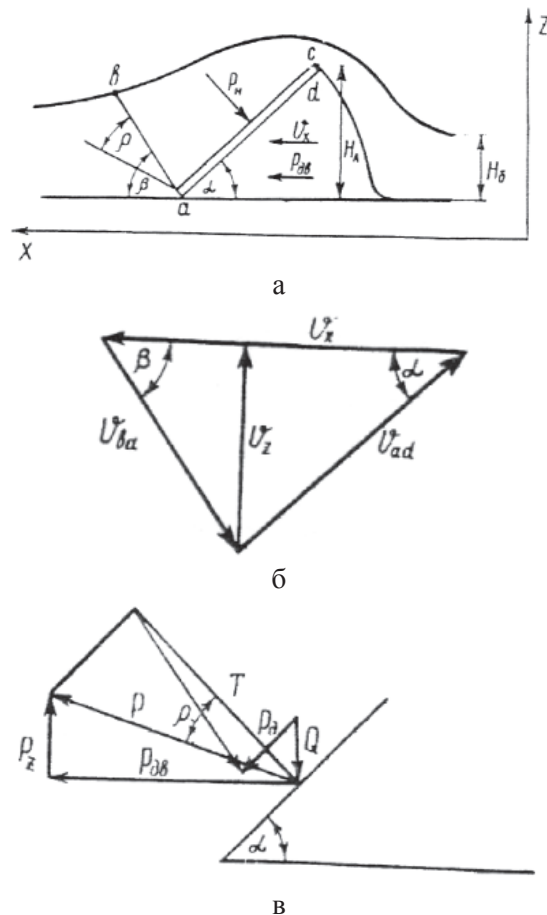


Рис. 3. Расчетная схема перемешивания смеси

Составим уравнение баланса мощности, потребляемой наклонной лопастью. Исходя из рис. 3 имеем

$$v_{ad} \cdot P_{db} \cdot \cos \alpha = v_{ad} \cdot (P_{db} \cdot f \sin \alpha + P_z \cdot f \cos \alpha + P_z \cdot \sin \alpha).$$

Поскольку v_{ad} сокращается, в дальнейшем можно рассматривать условие равновесия сил:

$$P_{db} \cdot \cos \alpha = P_{db} \cdot f \sin \alpha + P_z \cdot f \cos \alpha + P_z \cdot \sin \alpha.$$

При большом заглублении лопасти в смесь и произвольном расположении ее в пространстве во время перемешивания смесь перемещается по плоскости лопасти в сторону наименьшего сопротивления, и сила давления Q' будет направлена перпендикулярно к основанию l_{bd} треугольника cbd , у которого линия l_{bc} – линия скольжения частицы (рис. 1, а).

Из рис. 1, а следует:

$$l_{ad} \perp l_{bd}; l_{cd} \perp l_{ac}; l_{bc} \perp l_{cd}; l_{bd} \perp l.$$

Из треугольника cbd находим

$$\sin a = \frac{l_{cd}}{l_{bd}},$$

где

$$l_{cd} = l_{ad} \cdot \sin \gamma;$$

$$l_{ad} = l_{ab} \left(\frac{\cos \omega}{\sin \omega} \right) = l_{ab} \cdot \operatorname{ctg} \omega;$$

$$l_{bd} = \frac{l_{ab}}{\sin \omega}.$$

С учетом этого имеем

$$\sin a = \sin \gamma \cdot \cos \omega. \quad (5)$$

На основании вышеизложенного получим

$$P = \frac{Q(\sin a + f \cos a)}{\cos a - f \sin a} = Q \operatorname{tg}(a + p); \quad (6)$$

$$\eta = \frac{\operatorname{tga}(\cos a - f \sin a)}{\sin a + f \cos a}. \quad (7)$$

Или с учетом (6)

$$\eta = \frac{\operatorname{tga}}{\operatorname{tg}(a + p)}, \quad (8)$$

где p – угол внутреннего трения смеси.

Заметим что вид формулы (8) совпадает с известными зависимостями [11, 4], однако угол a здесь не равен углу γ наклона лопасти, используемого при расчетах КПД наклонной лопасти (рис. 1).

Используя формулы (6), (8), можно показать, что перемещение лопасти в направлении линии скольжения bc имеет наименьшее сопротивление.

На рис. 1, б показаны три мнимые положения точки C : C , C_1 , C_2 . Поскольку Q сила – величина постоянная для рассматриваемого случая, сопротивление перемещению лопасти будет наименьшим (рис. 1, б и формула (6)).

Если l_{cd} будет перпендикулярна l_{ac} , при смещении точки C вдоль линии ac угол a возрастает как в направлении C_1 , так и в направлении C_2 . Поэтому величина силы сопротивления среды движению лопасти $P_{\text{ср}} = -P$ станет наименьшей и только тогда, когда l_{cd} перпендикулярна к l_{ac} . При изменении соотношения величин размеров l_{ab} и l_{AB} таким образом, чтобы $l_{ab} = \text{const}$, в этом случае следует учесть изменение силы Q , которая станет равной

$$Q = \sigma_z F_n \operatorname{tg}(a + p),$$

где $F_n = l_{a0} \cdot l_{ab}$; σ_z – вертикальное удельное давление смеси.

Может наступить момент, когда силы равны (рис. 1, а)

$$Q'_1 = Q'_2,$$

здесь

$$Q'_1 = \sigma_z F_{n1} \operatorname{tg}(a_1 + p);$$

$$Q'_2 = \sigma_z F_{n2} \operatorname{tg}(a_2 + p),$$

несмотря на то, что $a_2 > a_1$.

Второй случай аналогичен первому и описывается теми же формулами и так же соответствует принципу наименьшего сопротивления движения смеси. Следовательно, при выборе угла установки лопасти необходимо учитывать соотношение ее размеров так, чтобы движение смеси по лопасти происходило в требуемом направлении. Желаемое соотношение размеров определяется из условия, при котором сила P была бы наименьшей при движении смеси по лопасти в желательном направлении.

Условно горизонтальной плоскостью разделим лопасть на две зоны (рис. 2).

Очевидно, что в случае, когда $l_{a_1 b_1} > \frac{l_{a_1 c_1}}{\operatorname{tg} \omega}$

будет преобладать движение по линии $b_2 c_2$.

Если же $l_{a_1 b_1} < \frac{l_{a_1 c_1}}{\operatorname{tg} \omega}$

нет движение вдоль линии $b_1 c_1$. Таким образом, следует учитывать эффект разделения потока даже при отсутствии ядра.

В этом случае

$$P = \sigma_z F_{n1} \operatorname{tg}(a_1 + p) + \sigma_z F_{n2} \operatorname{tg}(a_2 + p), \quad (9)$$

а

$$\eta = \frac{F_n (\operatorname{tga}_1 + \operatorname{tga}_2)}{F_{n1} \operatorname{tg}(a_1 + p) + F_{n2} \operatorname{tg}(a_2 + p)},$$

где F_n – общая площадь рабочей поверхности лопасти; F_{n1} – площадь рабочей поверхности нижней части лопасти; F_{n2} – площадь рабочей поверхности верхней части лопасти.

Такое же явление наблюдается и в том случае, если изменение размеров лопасти производится при условии $F_n = \text{const}$ (рис. 4). На этом рисунке показаны три лопасти A , B и D , имеющие одинаковую площадь поверхности F_n . Линией $b_1 c_1$ обозначена линия наименьшего сопротивления перемещению смеси. Очевидно, что для квадратной лопасти A нижняя зона скольжения $1|b_1 k c_1|$ и верхняя $2|b_1 A C_1|$ одинаковы по площади, а для прямоугольных лопастей B и D эти зоны 1 и 2 равны между собой.

Следовательно, выбирая соответствующее соотношение размеров верхней и нижней частей лопасти при сохранении

постоянства площади рабочей поверхности можно направлять встречный поток перемешиваемой смеси в желанную сторону, сохраняя рациональные, в энергетическом смысле, углы установки лопасти.

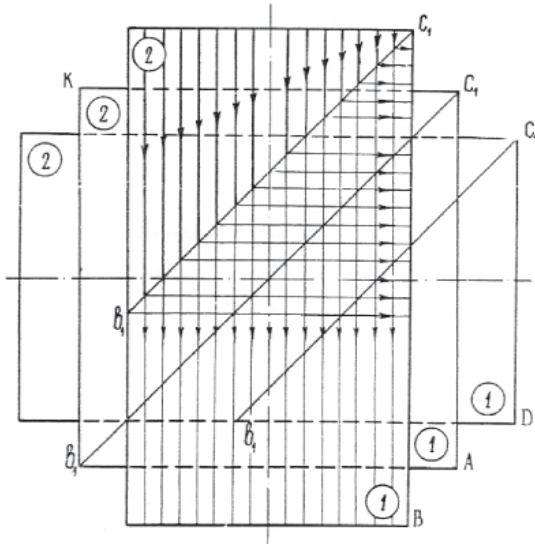


Рис. 4. Схема лопастей смесителя с равновеликими перемешивающими поверхностями

Например, известна лопасть, рабочая поверхность которой выполнена из вращающихся резиновых пневматических роликов. Тяговое сопротивление предложенной лопасти на 17% ниже обычной. Лопасть с роликовой поверхностью позволяет не только снизить силы трения, но и направлять поток смеси вдоль ряда роликов в заданном направлении.

Представим силу Q в виде

$$Q = \sigma_2 x \gamma, \quad (10)$$

здесь $x = \frac{H}{\operatorname{tg} \gamma}$.

A, B, D – лопасти; $b_1 c_1$ – линия наименьшего сопротивления движению смеси.

Тогда

$$Q = \sigma_2 \gamma \frac{H}{\operatorname{tg} \gamma},$$

и в соответствии (рис. 2)

$$P = \frac{\sigma_z \gamma H (\sin a + f \cos a)}{\operatorname{tg} \gamma (\cos a - f \sin a)}.$$

Умножив числитель и знаменатель на tga , получим

$$P = \frac{\sigma_z \gamma H (\sin a + f \cos a) \operatorname{tga}}{(\cos a - f \sin a) \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tga}},$$

с учетом формулы $\operatorname{tga}_1 = \operatorname{tg} \gamma \cdot \cos \omega_1$ имеем

$$P = \frac{\sigma_z \gamma H \cos \omega}{\eta}. \quad (11)$$

Расход энергии на единицу получаемой продукции определим из выражения

$$\xi = \frac{P v_{\text{л}}}{M_c \cdot \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{дв}}},$$

где $v_{\text{л}}$ – скорость перемещения лопасти; $\eta_{\text{мех}}$ и $\eta_{\text{дв}}$ – КПД механизма и двигателя смесителя; M_c – масса обработанной смеси на пути S перемещения лопасти.

$$G = \frac{H \gamma S \gamma_m \cos \omega}{m},$$

где γ_m – объемная масса смеси; m – число проходов;

$$S = v_{\text{л}} t,$$

где t – время перемешивания смеси.

С учетом вышеизложенного

$$\xi = \frac{\sigma_z \gamma H \cos \omega v m}{v \cdot \eta \cdot \eta_{\text{мех}} \cos \omega \eta_{\text{дв}} \gamma_m} = \frac{\sigma_z m}{\eta \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{дв}} \gamma_m}. \quad (12)$$

Следовательно, исходя из формул (11), (12) при соблюдении основных технологических условий, что ширина и высота захвата лопасти – величины неизменные, можно сделать вывод, что выигрыш в силе, энергоёмкость процесса перемешивания, относительная мощность и мощность, потребляемая бетоносмесителем, зависят от КПД лопасти.

КПД лопасти имеет максимум [10] и зависит от угла a подъема линии скольжения частицы материала по отношению к вектору скорости лопасти и от угла γ установки лопасти. Угол a подъема зависит от обоих углов установки лопасти γ и ω . Наиболее экономичное решение можно получить при $\omega = 0$, при этом $a = \gamma$ и длина лопасти получается наименьшей – равной ширине ее захвата.

Таким образом, рациональным является угол установки лопасти, равный $\gamma = a$.

Теоретические исследования показывают, что изменение направления движения потока материала возможно и конструктивными приемами.

Например, использование лопастей желобчатой и геликоидной формы [9] позволит управлять движением набегающего на них потока смеси при минимальном расходе электрической энергии.

Список литературы

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов. – Н.: Наука, 1967. – С. 719.
2. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / В.С. Демьянова, В.И.Калашников. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
3. Богданов В.С. Основные процессы в производстве строительных материалов: учебник / В.С. Богданов, А.С. Ильин, И.А. Семикопенко. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 551 с.
4. Горячкин В.П. Собрание сочинений в 3-х томах. – М.: Колос, 1968. – т. 2. – С. 455.
5. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 269.
6. Колчин Н.И. Механика машин. – Л.: Машиностроение, 1972. – т. 2. – С. 456.
7. Королев К.М. Интенсификация приготовления бетонной смеси. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 144.
8. Кузнецова Е.Ф., Соболев Г.М., Соболев К.Г. Получение эффективных литых бетонных смесей и бетонов на основе наноматериалов и отходов камнеобработки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 2. – С. 7–10.
9. Патент РФ № 2014125744/0, 02.09.2014. Богданов В.С., Несмеянов Н.П., Дмитриенко В.Г., Матусов М.Г. Смеситель // Патент России № 149622.2015 Бюл. № 1.
10. Пулин В.П. Повышение эффективности смесителей принудительного действия. Информационный листок. – Запорожье: Запорожский ЦТИ 1972. – № 163.
11. Юдин К.А., Богданов Д.В. Двухнаправленное воздействие на материал в смесителях периодического действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 4. – С. 108–111.

References

1. Artobolevskij I.I. Teorija mehanizmov. N.: Nauka, 1967. pp. 719.
2. Bazhenov Ju.M. Modificirovannye vysokokachestvennye betony / Demjanova B.C., Kalashnikov V.I. Nauchnoe izdanie. M.: Izdatelstvo Associacii stroitelnyh vuzov, 2006. 368 p.
3. Bogdanov V.S. Osnovnye processy v proizvodstve stroitelnyh materialov: uchebnik / V.S. Bogdanov, A.S. Ilin, I.A. Semikopenko Belgorod: izd-vo BGТУ, 2008. 551 p.
4. Gorjachkin V.P. Sbranie sochinenij v 3-h tomah. M.: Kolos, t. 2, 1968. pp. 455.
5. Kozhevnikov S.N. Teorija mehanizmov i mashin. M.: Mashinostroenie, 1969. pp. 269.
6. Kolchin N.I. Mehanika mashin. L.: Mashinostroenie, t. 2, 1972. pp. 456.
7. Korolev K.M. Intensifikacija prigotovlenija betonnoj smesi. M., Strojizdat, 1976, pp. 144.
8. Kuznecova E.F., Sobolev G.M., Sobolev K.G. Poluchenie jeffektivnyh lityh betonnyh smesej i betonov na osnove nanomaterialov i othodov kamneobrabotki. Vestnik BGТУ im. V.G. Shuhova. 2014, no. 2, pp. 7–10.
9. Patent RF no. 2014125744/0, 02.09.2014. Bogdanov V.S., Nesmejanov N.P., Dmitrienko V.G., Matusov M.G. Smesitel // Patent Rossii no. 149622.2015 Bjul. no. 1. 456 p.
10. Pulin V.P. Povyshenie jeffektivnosti smesitelej prituditel'nogo dejstvija. Informacionnyj listok. Zaporozhe: Zaporozhskij CTI. no. 163, 1972.
11. Judin K.A., Bogdanov D.V. Dvunapravlennoe vozdejstvie na material v smesiteljah periodicheskogo dejstvija. Vestnik BGТУ im. V.G. Shuhova. 2014, no. 4. pp. 108–111.