

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ПРИВОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЛОПАСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ханин С.И., Воронов В.П., Кикин Н.О., Мордовская О.С.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Ключевые слова: потребляемая мощность, лопасть, процесс смешивания, смеситель, стержневые элементы, лобовое сопротивление, трение.

Аннотация. Смешивание является одним из основных технологических процессов в промышленности строительных материалов, химической и ряде других. Для получения сухих строительных смесей распространено использование двухвальных лопастных смесителей отечественного и зарубежного производства. В условиях постоянной конкуренции улучшаются технические характеристики этих смесительных машин. Применение в двухвальном смесителе стержневых элементов цилиндрической формы, расположенных перед рабочими поверхностями лопастей, позволяет получить смесь более высокого качества. Разработано математическое описание мощности, затрачиваемой на взаимосвязанное преодоление лопастями и установленными перед ними стержневыми элементами цилиндрической формы сил лобового сопротивления сыпучего материала при вращении лопастного вала. Применение его, как составляющей в известном математическом описании общей мощности, затрачиваемой приводом лопастного смесителя, позволяет использовать это описание при осуществлении проектирования смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрической формы перед рабочими поверхностями лопастей. С использованием математического описания общей мощности, затрачиваемой приводом лопастного смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрической формы перед рабочими поверхностями лопастей, выполнены исследования влияния частоты вращения лопастных валов и угла установки лопастей на затрачиваемую общую мощность и ее составляющие при подготовке цементно-песчаной смеси. Установлены характер их изменения и соотношения величин при изменении варьируемых параметров в диапазонах рабочих значений.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE POWER CONSUMED BY THE DRIVE OF A HORIZONTAL PADDLE MIXER WITH CYLINDRICAL ROD ELEMENTS

Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O.S.

Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod

Keywords: power consumption, blade, mixing process, mixer, rod elements, drag, friction.

Abstract. Mixing is one of the main technological processes in the building materials, chemical and other industries. To obtain dry building mixes, the use of two-shaft paddle mixers of domestic and foreign production is common. In the face of constant competition, the technical characteristics of these mixers are improving. The use of cylindrical rod elements located in front of the working surfaces of the blades in a two-shaft mixer makes it possible to obtain a mixture of a higher quality. A mathematical description of the power expended on the interconnected overcoming by the blades and the rod elements of the cylindrical shape installed in front of them of the drag forces of the bulk material during the rotation of the bladed shaft has been developed. Its use as a component in the well-known mathematical description of the total power expended by the drive of a paddle mixer makes it possible to use this description when designing a mixer with cylindrical rod elements installed in front of the working surfaces of the blades. Using a mathematical description of the total power expended by the drive of a paddle mixer with cylindrical rod elements installed in front of the working surfaces of the blades, studies were made of the influence of the rotational speed of the paddle shafts and the angle of the blades on the total power expended and its components in the preparation of the cement-sand mixture. The nature of their change and the ratio of values when changing the variable parameters in the ranges of operating values are established.

Введение. Смешивание является одним из основных технологических процессов в промышленности строительных материалов, химической и ряде других. Горизонтальные лопастные смесители распространены для приготовления как двух, так и многокомпонентных смесей различных материалов. Наличие большого количества производителей промышленной смесительной техники является предпосылкой её эволюционного

совершенствования. В условиях постоянной конкуренции технические характеристики смесительных машин претерпевают изменения. За счет их конструктивно-технологического совершенствования повышается производительность; улучшаются показатели, характеризующие качество подготовки смеси; снижаются удельные показатели энергоемкости и металлоемкости; уменьшаются размеры. Существует достаточно большое количество технических решений, направленных на изменение характера воздействия рабочих органов на смешиваемые материалы. Так, на лопастные валы двухвальных смесителей немецкой фирмы BHS установлены индивидуальные приводы. При непрерывном режиме работы лопастные валы осуществляют пространственное перемещение смеси [1]. При высоком качестве приготовления смеси типоразмерным рядом этих машин обеспечивается производительность 45...160 м³/ч при установочной мощности приводов 22...74 кВт. Фирма Sicoma (Италия) выпускает смесители различных типоразмеров производительностью 40...320 м³/ч с установочными мощностями приводов 44...300 кВт. Особенности воздействия рабочих органов на компоненты смеси обеспечивают их эффективное перемешивание при пониженном износе бронефутеровки корпуса.

Применение в двухвальном смесителе стержневых элементов цилиндрической формы, расположенных перед рабочими поверхностями лопастей, позволяет получить смесь более высокого качества [2, 3]. Характеризующее этот показатель значение концентрации ключевого компонента при приготовлении цементно-песчаной смеси уменьшается на 7,7%. Установленные закономерности процесса смесеобразования дают возможность определить рациональные значения конструктивно-технологических параметров смесителя. Для осуществления проектирования смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрической формы необходима разработка математического описания затрачиваемой на процесс приготовления смеси мощности.

Материалы и методы исследования. Для построения математического описания затрачиваемой на процесс приготовления смеси в смесителе с установленными стержневыми элементами цилиндрической формы мощности, рассмотрим подход к определению затрачиваемой приводом лопастного смесителя мощности в известной методике [4-7]. Мощность, затрачиваемую приводом горизонтального лопастного смесителя, можно определить с помощью известного выражения:

$$N_{прив1} = \frac{\lambda \cdot N_{общ1}}{\eta}, \quad (1)$$

где $N_{общ1}$ – общая мощность, затрачиваемая на процесс смешивания, Вт;

η – общий КПД привода ($\eta=0,75...0,85$);

λ – коэффициент, учитывающий дополнительные энергетические потери ($\lambda=1,1...1,3$).

Общая мощность состоит из следующих слагаемых:

$$N_{общ1} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4, \quad (2)$$

где N_1 – мощность, затрачиваемая на преодоление лобового сопротивления движению лопасти в среде сыпучих материалов, Вт;

N_2 – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала о поверхность лопасти, Вт;

N_3 – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала о стенки корпуса лопастного смесителя, Вт;

N_4 – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения материала о кронштейн лопасти, Вт;

Составляющие N_2, N_3, N_4 достаточно точно описываются в существующих методиках, в дополнительном исследовании не нуждаются и будут представлены в статье далее. Составляющая мощности N_1 , в связи с установкой стержневых элементов цилиндрической формы, нуждается в изменении.

Значение мощности, которая расходуется на преодоление сил лобового сопротивления, зависит от изменения коэффициента сопротивления смешиваемой среды c_s [8-10]. Логично

предположить, что коэффициент сопротивления зависит от следующих безразмерных величин – $c_s(\varphi, \xi_1)$:

$$\varphi = \omega \cdot t, \quad (3)$$

$$\xi_1 = \frac{r}{b_n \cdot \sin \alpha}, \quad (4)$$

где ω – угловая частота вращения лопастных валов, рад/с; t – время смешивания, с; r – текущее радиальное расстояние, пройденное частичками сыпучего материала вдоль поверхности лопасти, м; b_n – ширина лопасти, м; α – угол поворота лопасти относительно плоскости вращения, рад.

Допустим, что вклад в величину коэффициента сопротивления каждой из величин в формулах (3) и (4) является независимым. На основании допущения можно записать выражение:

$$c(\varphi, \xi_1) = \text{const} \cdot e^{\varphi + \xi_1}. \quad (5)$$

Граничное условие, позволяющее определить константу,

$$c(\varphi_0, \xi_0) = c_0, \quad (6)$$

где c_0 – значение коэффициента сопротивления движению лопасти в воздушной среде [11, 12]; φ_0 – начальное значение угла входа лопасти в сыпучий материал, град.

Безразмерная величина ξ_0 определяется соотношением:

$$\xi_0 = \frac{L}{b_n \cdot \sin \alpha}, \quad (7)$$

где L – длина лопасти, м.

Применение граничного условия (6) позволяет получить следующий результат:

$$c(\varphi, \xi) = c_0 \cdot \exp\left(-(\varphi_0 - \varphi) - \frac{L - r}{b_n \cdot \sin \alpha}\right). \quad (8)$$

Сыпучая среда действует на лопасть с давлением, определяемым по формуле:

$$p = c(\varphi, \xi) \cdot \rho \cdot v^2, \quad (9)$$

где ρ – насыпная плотность материала, кг/м³; v – линейная скорость движения лопасти, м/с.

Среднее значение давления \bar{p} , действующее на единицу длины лопасти, будет определяться при помощи выражения:

$$\bar{p} = \frac{c_0 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot e^{-(\varphi_0 - \varphi)} \cdot b_n \cdot \sin \alpha}{L} \cdot e^{-(\varphi_0 - \varphi)} \cdot \left(e^{\frac{r_0}{b_n \cdot \sin \alpha}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{L - r_0}{b_n \cdot \sin \alpha}} \right) \right). \quad (10)$$

Согласно расчетной схеме, представленной на рисунке 1, определим площадь элементарной поверхности лопасти, участвующей в перемещении смешиваемых компонентов:

$$dS = b_n \cdot \sin \alpha \cdot dr. \quad (11)$$

Величина окружной скорости выделенной площадки (11) будет определяться соотношением:

$$v_r = \omega \cdot r. \quad (12)$$

Величина элементарной силы сопротивления, оказываемой площадью элементарной поверхности лопасти в среде сыпучего материала, будет равна:

$$df = \bar{p} dS. \quad (13)$$

На основании соотношений (10), (11) и (13) находим полную работу силы лобового сопротивления лопасти при её движении в объеме сыпучего материала.

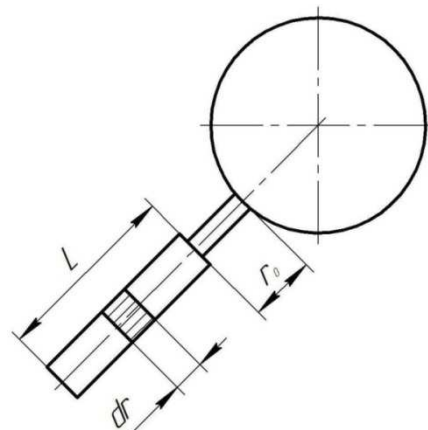


Рис. 1. Схема для расчета элементарной работы по перемещению сыпучего материала лопастью смесителя

$$A = \frac{c_0}{4 \cdot L} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot b_k^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot ((r_0 + L)^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{b_n \cdot \sin \alpha}\right) \cdot (-1 + \exp(\varphi_k - \varphi_0)) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{L - r_0}{b_n \cdot \sin \alpha}\right)\right). \quad (14)$$

Следует учесть, что при установке стержневых элементов цилиндрической формы перед рабочей поверхностью лопасти мощность $N_{л.с.}$, затрачиваемая на их взаимосвязанное преодоление лобового сопротивления сыпучего материала, будет состоять из двух слагаемых:

$$N_{л.с.} = N_{л.с.1} + N_{л.с.2}, \quad (15)$$

где $N_{л.с.1}$ – величина мощности, затрачиваемой на преодоление силы лобового сопротивления рабочей поверхностью лопасти с учетом вычета миделевых сечений установленных стержневых элементов, Вт; $N_{л.с.2}$ – величина мощности, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления стержневого элемента цилиндрической формы, Вт.

Обозначим мощность, затрачиваемую на преодоление силы лобового сопротивления лопасти при её движении в объеме сыпучего материала без учета установленных стержневых элементов перед её рабочей поверхностью как $N_{л.с.0}$. С учетом выражения (14), мощность $N_{л.с.0}$ можно определить по формуле:

$$N_{л.с.0} = \frac{c_0}{4 \cdot L} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot b_n^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot ((r_0 + L)^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{b_n \cdot \sin \alpha}\right) \cdot (-1 + \exp(\varphi_k - \varphi_0)) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{L - r_0}{b_n \cdot \sin \alpha}\right)\right). \quad (16)$$

На основании формулы (16) можно записать выражение, которое определяет затрачиваемую мощность $N_{л.с.1}$:

$$N_{л.с.1} = \frac{c_0}{4 \cdot L} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \tilde{b}^2 \cdot ((r_0 + L)^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{\tilde{b}}\right) \cdot (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{L - r_0}{\tilde{b}}\right)\right), \quad (17)$$

здесь величина:

$$\tilde{b} = b_n \cdot \sin(\alpha) - 2 \cdot d_0, \quad (18)$$

t_k – время воздействия лопасти на сыпучий материал в объеме смесителя, с.

$$t_k = \frac{(\varphi_k - \varphi_0)}{\omega}, \quad (19)$$

где φ_k – значение угла выхода лопасти из сыпучего материала, град.

Формула (17) учитывает фактическое уменьшение ширины лопасти при установке перед ней двух стержневых элементов цилиндрической формы.

Мощность, затрачиваемая на преодоление лобового сопротивления сыпучей среды движению стержней цилиндрической формы, определяется выражением:

$$N_{л.с.2} = \frac{c_1}{4 \cdot L} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d_0^2 \cdot ((r_0 + L)^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{d_0}\right) \cdot (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{L - r_0}{d_0}\right)\right), \quad (20)$$

где c_1 – коэффициент сопротивления цилиндрического стержня в воздушной среде.

Суммарная мощность $N_{л.с.}$, затрачиваемая на преодоление сил лобового сопротивления при вращении лопастного вала с i -ым количеством лопастей и с z -ым количеством установленных стержневых элементов цилиндрической формы в сыпучей среде материала, при заполнении камеры смешивания до уровня, не превышающего диаметр, описываемого лопастью, будет определяться по формуле:

$$N_{л.с.} = i \cdot \left(\frac{c_0}{4 \cdot L} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \tilde{b}^2 \cdot ((r_0 + L)^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{\tilde{b}}\right) \cdot (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{L - r_0}{\tilde{b}}\right)\right)\right) + z \cdot \left(\frac{c_1}{4 \cdot L} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d_0^2 \cdot ((r_0 + L)^4 - r_0^4) \cdot \exp\left(\frac{r_0}{d_0}\right) \cdot (\exp(\omega \cdot t_k) - 1) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{L - r_0}{d_0}\right)\right)\right), \quad (21)$$

где i – количество установленных лопастей, шт.; z – количество установленных стержневых элементов цилиндрической формы, шт.

Для определения полной мощности, потребляемой приводом двухвального смесителя с установленными стержневыми элементами перед рабочей поверхностью лопасти, воспользуемся известными выражениями [4-6].

$$N_2 = 0,67 \cdot \pi \cdot R_{cp}^2 \cdot c_{cp} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot (R_n^3 - R_{внутр.}^3) \cdot i \cdot \psi_D \cdot k_3 \cdot f, \quad (22)$$

где c_{cp} – коэффициент сопротивления, зависящий от состава и консистенции смеси ($c_{cp} = 3 \dots 9$); R_{cp} – средний радиус вращения лопастей, м; R_n – наружный радиус установленных лопастей, м; $R_{внутр.}$ – внутренний радиус установленных лопастей, м; ψ_D – коэффициент, зависящий от длины дуги рабочей поверхности лопасти; k_3 – коэффициент заполнения корпуса смесителя ($k_3 = 0,55 \dots 0,6$); f – коэффициент трения материала о сталь ($f = 0,5 \dots 0,65$).

$$N_3 = 0,4 \cdot \pi \cdot c_{cp} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot (R_k^5 - R_n^5) \cdot i \cdot \psi_D \cdot k_3, \quad (23)$$

$$N_4 = 0,25 \cdot c_{cp} \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot d_k \cdot (R_{н.кр.}^4 - R_{в.кр.}^4) \cdot i \cdot k_3, \quad (24)$$

где d_k – диаметр кронштейна лопасти, м; $R_{н.кр.}$ – наружный радиус вращения кронштейна лопасти, м; $R_{в.кр.}$ – внутренний радиус вращения кронштейна лопасти, м.

После подстановки (21), (22), (23), (34) в формулу (2) получим выражение для определения общей мощности $N_{общ.}$, затрачиваемой на процесс смешивания.

$$N_{общ1} = N_{л.с.} + N_2 + N_3 + N_4. \quad (25)$$

Подставив полученное выражение общей мощности $N_{общ}$ вместо $N_{общ1}$ в формулу (1), получим выражение для определения мощности $N_{прив.}$, потребляемой приводом двухвального смесителя с установленными стержневыми элементами перед рабочей поверхностью лопасти.

$$N_{прив} = \frac{\lambda \cdot N_{общ}}{\eta}. \quad (26)$$

Результаты. Используем приведенное математическое описание для расчета мощности привода промышленного горизонтального двухвального лопастного смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрической формы перед рабочими поверхностями лопастей. Назначение смесителя – приготовление сухой цементно-песчаной смеси с объемом загрузки $V = 1,2 \text{ м}^3$. С использованием рекомендаций [13] определены его следующие технические характеристики: диапазон частоты вращения лопастных валов $n = 0,5 \dots 1 \text{ с}^{-1}$; диапазон угла установки лопастей по отношению к плоскости вращения $\alpha = 20 \dots 40^\circ$; наружный радиус, описываемый лопастью $R_n = 0,445 \text{ м}$; высота лопасти $L = 0,23 \text{ м}$; ширина лопасти $b = 0,19 \text{ м}$; количество лопастей $i = 12$ шт; количество установленных стержневых элементов цилиндрической формы $z = 24$ шт; диаметр установленных стержневых элементов $d_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$. Наличие диапазонов изменения частот вращения лопастных валов углов установки лопастей обусловлены возможностью применения смесителя для приготовления цементно-песчаных смесей с различными гранулометрией компонентов и их соотношением.

С использованием вычислительного программного пакета *Maple* было исследовано влияние конструктивно-технологических параметров рассматриваемого смесителя на его затрачиваемую общую мощность и ее составляющие. На рисунке 2 приведены характеризующие изменение этих показателей графические зависимости. Увеличение частоты вращения лопастных валов и угла установки лопастей, в рассматриваемом диапазоне изменения их значений, приводит к существенному росту величин, как общей мощности, так и ее составляющих, кроме составляющей мощности N_4 .

Так, при фиксированных минимальной частоте вращения лопастных валов $n_1 = 0,5 \text{ с}^{-1}$ и углах установки лопасти $\alpha_1 = 20^\circ$, $\alpha_2 = 30^\circ$, $\alpha_3 = 40^\circ$ общая мощность, затрачиваемая на процесс смешивания, соответственно будет равна $N_{общ.11} = 929 \text{ Вт}$, $N_{общ.12} = 2082 \text{ Вт}$, $N_{общ.13} = 3786 \text{ Вт}$.

При увеличении частоты вращения лопастных валов до $n_2=0,75 \text{ с}^{-1}$, и указанных выше углах установки лопасти, затраты общей мощности на процесс смешивания соответственно будут составлять $N_{общ.14}=3134 \text{ Вт}$, $N_{общ.15}=7028 \text{ Вт}$, $N_{общ.16}=12778 \text{ Вт}$.

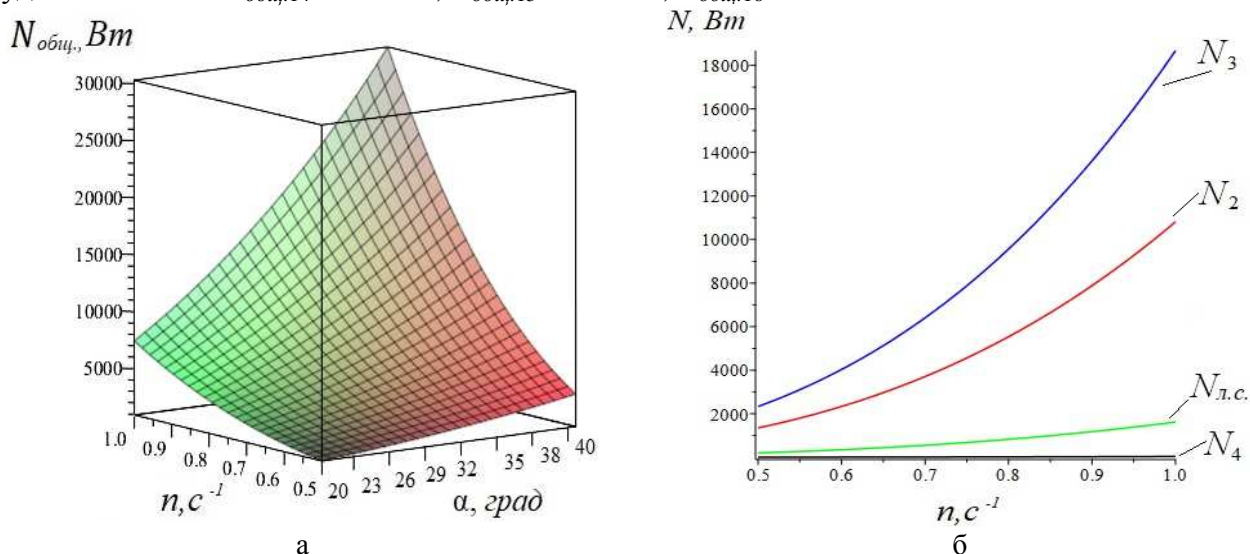


Рис. 2. Графические зависимости: а – общей мощности, затрачиваемой на процесс смешивания, от частоты вращения лопастных валов n и угла установки лопастей α ; б – составляющих общей мощности смесителя от частоты вращения лопастных валов n при $\alpha=30^\circ$

При увеличении частоты вращения валов до максимального значения $n_3=1 \text{ с}^{-1}$ и значениях углов установки лопастей $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, затрачиваемая общая мощность на процесс смешивания в двухвальном лопастном смесителе соответственно составит $N_{общ.17}=7430 \text{ Вт}$, $N_{общ.18}=16662 \text{ Вт}$, $N_{общ.19}=30288 \text{ Вт}$.

При изменении значений частоты вращения лопастных валов в пределах $n=0,5 \dots 0,8 \text{ с}^{-1}$ и угла установки лопастей – $\alpha=20 \dots 30^\circ$, общая мощность и ее составляющие принимают следующий диапазон значений: $N_{общ}=928 \dots 8531 \text{ Вт}$, $N_{л.с.}=202 \dots 1722 \text{ Вт}$, $N_2=255 \dots 2397 \text{ Вт}$, $N_3=467 \dots 4393 \text{ Вт}$ и $N_4=5 \dots 18 \text{ Вт}$. На составляющие общей мощности, в соответствии с порядком их указания, приходится 20,6...20,1%; 27,5...28,1%; 50,3...51,5%; 0,5...0,2% от ее величины. Значения $N_{л.с.}$ превышают N_4 в 40,4...95,7 раза, а по отношению к N_2 и N_3 она меньше в 1,3...1,4 раза и 2,3...2,6 раза соответственно.

Расчетная проектная мощность привода, с учетом его общего КПД и коэффициента дополнительных энергетических потерь λ , при принятых максимальных значениях $\alpha_3=40^\circ$ и $n_3=1 \text{ с}^{-1}$, составляет $N_{прив}=52\,499 \text{ Вт}$.

Выводы

1. Отмечено применение лопастных смесителей для подготовки двух и многокомпонентных смесей в различных отраслях промышленности. Показано их постоянное совершенствование, направленное на улучшение технических характеристик. Обоснована разработка математического описания мощности, затрачиваемой на процесс приготовления смеси в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами цилиндрической формы, расположенными перед рабочими поверхностями лопастей.

2. Предложено для разработки математического описания общей мощности, затрачиваемой на процесс приготовления смеси в горизонтальном лопастном смесителе с указанными стержневыми элементами цилиндрической формы, использовать подход к определению затрачиваемой приводом лопастного смесителя мощности в известной методике и ее частичное описание. Заменить математическое описание мощности N_1 , затрачиваемой на преодоление лобового сопротивления движению лопасти в среде сыпучих материалов, на отличающееся от него математическое описание мощности $N_{л.с.}$, затрачиваемой на взаимосвязанное преодоление лопастями и установленными перед ними

стержневыми элементами цилиндрической формы сил лобового сопротивления сыпучего материала.

3. Разработано математическое описание мощности $N_{л.с.}$, затрачиваемой на взаимосвязанное преодоление лопастями и установленными перед ними стержневыми элементами цилиндрической формы сил лобового сопротивления сыпучего материала при вращении лопастного вала с i -ым количеством лопастей и с z -ым количеством установленных стержневых элементов цилиндрической формы. Применение его, как составляющей в известном математическом описании общей мощности, затрачиваемой приводом лопастного смесителя, позволяет использовать это описание при осуществлении проектирования смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрической формы перед рабочими поверхностями лопастей.

4. С использованием вычислительного программного пакета *Maple* исследовано влияние конструктивно-технологических параметров рассматриваемого смесителя с установленными стержневыми элементами цилиндрической формы перед рабочими поверхностями лопастей на затрачиваемую общую мощность и ее составляющие. Установлены характер их изменения и соотношения величин при варьировании конструктивно-технологических параметров в областях значений: $n=0,5...1 \text{ с}^{-1}$ и $\alpha=20...40^\circ$.

Список литературы

1. Кикин Н.О., Самойленко Д.Г., Болотникова Н.В., Котова Л.Н. Сравнительная характеристика двухвалных смесителей зарубежного производства // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвузовский сборник статей, Белгород, 01-20 декабря 2019 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 168-172.
2. Ханин С.И., Воронов В.П., Кикин Н.О., Мордовская О.С. Исследование изменения концентрации ключевого компонента сухой смеси в горизонтальном лопастном смесителе с цилиндрическими стержнями // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2022. – №2. – С. 94-101.
3. Кикин Н.О. Интенсификация процесса смешивания в смесителе принудительного действия путем устранения уплотнения из смешиваемого материала перед лопастью // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – №7. – С. 27-32. – DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-27-32.
4. Бардаев С.В., Гурченко Н.И. Расчет мощности лопастного смесителя непрерывного действия // Транспорт. Дорожні та будівельні машини. – 2009. – №1. – С. 57-60.
5. Маслов А.Г., Саленко Ю.С. Исследование взаимодействия лопатки вибрационного смесителя бетонной смесью // Вестник ХНАДУ. – 2014. – Вып. 65-66. – С. 44-48.
6. Морозов М.К. Механическое оборудование заводов сборного железобетона. – Киев: Высшая школа, 1986. – 311 с.
7. Остриков А.Н., Фролова Л.Н., Александров А.И., Посметьев В.В. Имитационная математическая модель процесса смешивания сыпучих компонентов в смесителе // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2019. – Т. 81, №2(80). – С. 13-21.
8. Фролов В.А., Козлова А.С. Влияние пластин вблизи круглого цилиндра на лобовое сопротивление // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник трудов в 4-х томах, Уфа, 19-24 августа 2019 года. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. – С. 449-450.
9. Ведищев С.М., Хольшев Н.В., Прохоров А.В., Кажияхметова А.А., Бралиев М.А. Исследование коэффициента лобового сопротивления лопатки // Наука в центральной России. – 2019. – №3(39). – С. 30-36.
10. Матусов М.Г., Несмеянов Н.П., Флоринский В.В. Расчет мощности бетоносмесителя с новой формой лопастей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 7. – С. 100-105.
11. Гречихин Л.И. Сила давления воздуха на движущуюся пластину // Военно-технический вестник. – 2014. – №4. – С. 38-50.
12. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
13. Севров К.П., Камчатков Л.П. Установки для приготовления асфальтобетонных и битумоминеральных смесей. – М.: Машиностроение, 1971. – 129 с.

References

1. Kikin N.O., Samoilenko D.G., Bolotnikova N.V., Kotova L.N. Comparative characteristics of foreign-made two-shaft mixers // Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials:

interuniversity collection of articles, Belgorod, December 01-20, 2019. – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2019. – P. 168-172.

2. Khanin S.I., Voronov V.P., Kikin N.O., Mordovskaya O.S. Investigation of the change in the concentration of the key component of the dry mixture in a horizontal paddle mixer with cylindrical rods // Bulletin BGTU n.a. V.G. Shukhov. 2022, no. 2, pp. 94-101.
3. Kikin N.O. Intensification of the mixing process in a forced mixer by eliminating the compaction from the mixed material before the blade // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2020, no. 7, pp. 27-32. DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-27-32.
4. Bardaev S.V., Gurchenko N.I. Calculation of the power of a continuous blade mixer // Transport. Road and wake-up cars. 2009, no. 1, pp. 57-60.
5. Maslov A.G., Salenko Yu.S. Research of the interaction of the vibratory mixer blade with concrete mix // Bulletin KhNaRU. 2014, iss. 65-66, pp. 44-48.
6. Morozov M.K. Mechanical equipment of prefabricated reinforced concrete plants. – Kyiv: Higher School, 1986. – 311 p.
7. Ostrikov A.N., Frolova L.N., Aleksandrov A.I., Posmetiev V.V. Simulation mathematical model of the process of mixing bulk components in a mixer // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2019, vol. 81, no. 2(80), pp. 13-21.
8. Frolov V.A., Kozlova A.S. Effect of plates near a circular cylinder on drag // XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics: Proceedings in 4 volumes, Ufa, August 19-24, 2019. – Ufa: Bashkir State University, 2019. – P. 449-450.
9. Vedischev S.M., Vedischev S.M., Kholshch N.V., Prokhorov A.V., Kazhiyakhmetova A.A., Braliev M.A. Research of the drag coefficient of the blade // Science in Central Russia. 2019, no. 3(39), pp. 30-36.
10. Matusov M.G., Nesmeyanov N.P., Florinsky V.V. Calculation of the power of a concrete mixer with a new blade shape // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2017, no. 7, pp. 100-105.
11. Grechikhin L.I. Force of air pressure on a moving plate // Military technical bulletin. 2014, no. 4, pp. 38-50.
12. Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – 559 p.
13. Sevrov K.P., Kamchatkov L.P. Installations for the preparation of asphalt-concrete and bitumen-mineral mixtures. – M: Mechanical Engineering, 1971. – 105 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Ханин Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор	Khanin Sergei Ivanovich – doctor of technical sciences, professor
Воронов Виталий Павлович – кандидат физико-математических наук, профессор	Voronov Vitaly Pavlovich – candidate of physical and mathematical sciences, professor
Кикин Николай Олегович – аспирант	Kikin Nikolay Olegovich – postgraduate
Мордовская Ольга Сергеевна – кандидат технических наук, доцент nikolaykikin@gmail.com	Mordovskaya, Olga Sergeevna – candidate of technical sciences, associate professor

Получена 14.08.2022