

DOI

УДК 631.354.024.028

ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ МЕШАЛКИ МОКРОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ ОТ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ

А. Г. Иванов, В. И. Ширококов, М. Н. Калимуллин

Реферат. Один из нежелательных факторов при измельчении зерна молотковыми дробилками – образование пожаро- и взрывоопасной мучной пыли, которая вредна для здоровья обслуживающего персонала. Применяемые тканевые пылеуловители очищают воздух, выходящий из пневмосистемы дробилки, неэффективно. Одно из направлений развития оборудования для улавливания пыли – разработка или совершенствование существующих мокрых пылеуловителей. К числу факторов, влияющих на качество очистки, относится частота вращения лопасти мешалки, которая изменяется в зависимости от концентрации пыли в жидкости первой ступени. Через модернизированный пылеуловитель проходит не вся пылевоздушная смесь, а только ее избыточная часть. Это позволяет увеличить ресурс работы пылеуловителя до очередного обслуживания. Цель исследования – определение зависимости частоты вращения лопасти мешалки первой ступени пылеуловителя от плотности жидкости. В работе использовали методы математического моделирования, аппроксимации и регрессионного анализа, проводили корреляционный анализ. Теоретическими исследованиями выявлена гиперболическая зависимость частоты вращения лопасти мешалки от плотности коллоидного раствора, однако экспериментальные данные дали другие количественные показатели. Для определения необходимых параметров уравнения использовали метод наименьших квадратов для аппроксимации экспериментальных данных. Сравнение полученных расчетных величин с экспериментальными по коэффициенту детерминации, продемонстрировало высокую адекватность модели, $R^2 = 0,9705$. Представленная методика подбора уравнения регрессии показывает его хорошую сходимость с экспериментом. Уравнения, выведенные для лабораторной установки, можно пересчитать для промышленного образца, используя теорию подобия.

Ключевые слова: дробилка, пневмосистема, пылеуловитель, анализ, концентрация пыли, плотность, эффективность.

Введение. Производство концентрированных кормов высокого качества – первоочередная задача при развитии животноводства, которую невозможно решить без создания эффективной системы машин для кормоприготовления [1, 2].

Один из побочных факторов измельчения зерна вне зависимости от типа дробилки неизбежное образование пожаро- и взрывоопасной мучной пыли, которая также вредна для здоровья обслуживающего персонала [3...6].

В большей степени зоотехническим требованиям, в том числе по содержанию пылевидной фракции в готовом продукте,

соответствует продукция дробилок закрытого типа [7].

В то же время на сельскохозяйственных предприятиях широкое распространение получили дробилки открытого типа, которые также необходимо модернизировать [8, 9].

Существующие пылеуловители для дробилок зерна малоэффективны в силу ряда причин, главные из которых некачественная очистка тканевыми фильтрами и различного рода циклонами; значительное увеличение массо-габаритных показателей дробилок в результате использования циклонов или их наборов и другого оборудования [10...12].

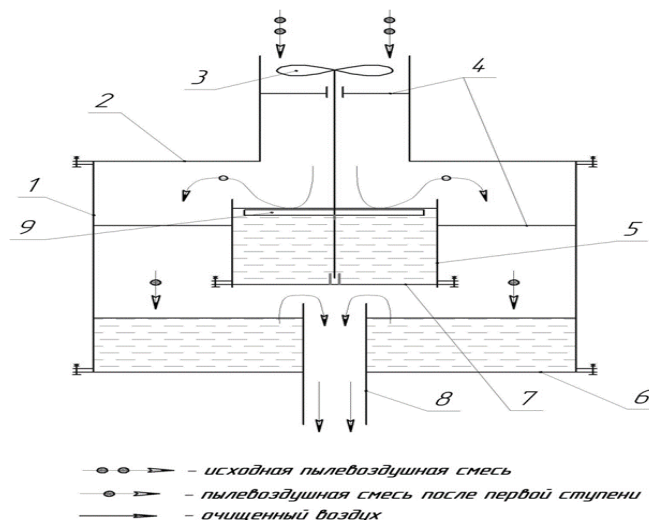


Рис. 1 – Схема лабораторной установки для двухступенчатого отделения пыли: 1 – корпус; 2 – крышка верхняя с патрубком; 3 – вентилятор с валом; 4 – спицы; 5 – корпус первой ступени; 6 – крышка; 7 – крышка первой ступени; 8 – отводящий патрубок; 9 – мешалка

Перспективным направлением развития оборудования для улавливания пыли служит разработка или совершенствование мокрых пылеуловителей. Модернизация системы улавливания пыли заключается в совершенствовании конструктивно-технологической схемы пылеуловителя (рис. 1) и технологической схемы дробилки зерна (рис. 2).

Пылевоздушная смесь в таком пылеуловителе поступает в патрубок, который установлен на крышке 2, под напором, создаваемым дробильным барабаном. При этом воздушный поток вращает вентилятор 3 (см. рис. 1). В нижней части вала вентилятора мешалка 9 отводит в стороны жидкость с частицами пыли на поверхности, очищая ее для новых

частиц. Пылевоздушная смесь ударяется о поверхность жидкости на первой ступени 5, затем второй ступени очистки (корпус 1), в результате чего частицы пыли попадают в жидкость и оседают на крышки 7 и 6, а воздух отводится через патрубок 8.

Предлагаемой пылеуловитель устанавливается в пневмосистеме дробилки, а отдельно и соединяют с ней посредством воздуховода с заслонкой с модулем очистки воздуха и отвода избыточного давления (рис. 2). Через модернизированный пылеуловитель проходит не вся пылевоздушная смесь, а только ее избыточная часть. Это позволяет увеличивать ресурс работы пылеуловителя до очередного обслуживания.

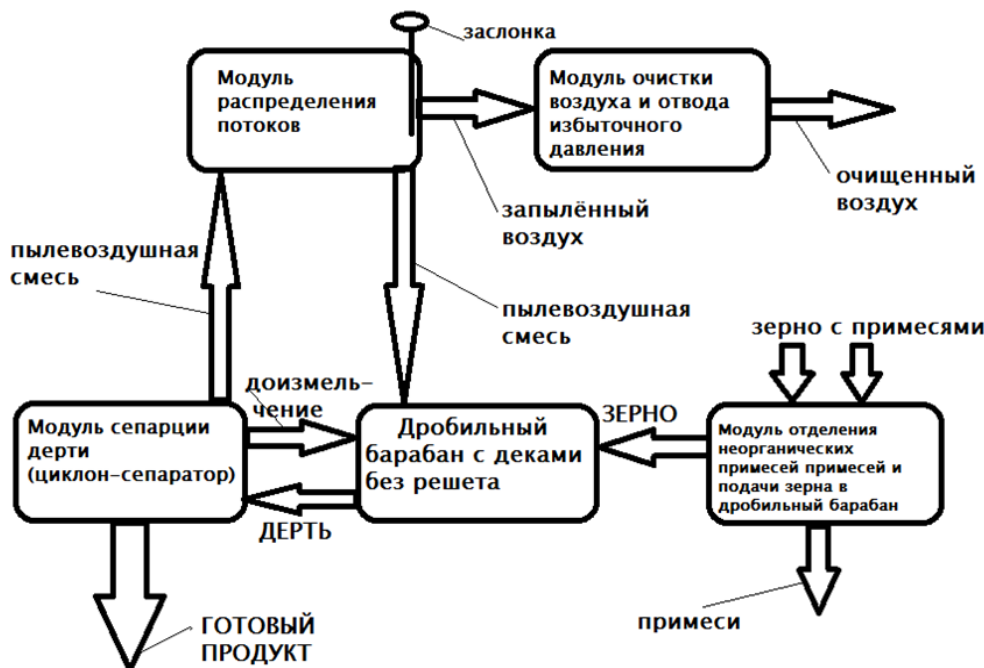


Рис. 2 – Усовершенствованная технологическая схема дробилки зерна

Результаты проведенных лабораторных исследований свидетельствуют, что с увеличением концентрации пыли в жидкости первой ступени пылеуловителя частота вращения вала мешалки снижается.

Это может привести к снижению эффективности отделения пыли первой ступенью пылеуловителя.

Цель исследования – определение зависимости частоты вращения лопасти мешалки первой ступени пылеуловителя от плотности жидкости.

Условия, материалы и методы. В работе использовали методы математического моделирования, аппроксимации и регрессионного анализа, проводили корреляционный анализ. С увеличением концентрации пыли в жидкости первой ступени повышается и ее плотность.

Отсюда можно записать условие, что момент от силы тяги лопастей вентилятора 3 F_v должен превышать момент от сопротивления вращению лопастей мешалки 9 F_m , то есть:

$$0,5F_v \cdot D_v > 0,5F_m \cdot D_m, \quad (1)$$

где D_v – диаметр лопастей вентилятора, м;
 D_m – диаметр лопастей мешалки, м.

Силу F_v можно установить из соотношения [13]:

$$F_v = a \cdot \rho \cdot n_v \cdot D_v^4 \quad (2)$$

где a – коэффициент тяги винта, зависящий от конструкции и профиля лопасти (примем его равным 1,3);

ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ;

n_v – частота вращения лопастей вентилятора, с^{-1} . Сопротивление F_m можно рассчитать из выражения [14]:

$$F_m = C_k \cdot \rho_{ж} \cdot V^2 \cdot S, \quad (3)$$

где C_k – безразмерный коэффициент сопротивления лопасти (для четырех лопастной мешалки примем его равным 1,2);

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м^3 ;

V – окружная скорость лопастей, м/с ;

S – общая площадь лопастей мешалки, м^2 .

Если выразить окружную скорость лопастей через частоту их вращения и принять равенство диаметров лопастей вентилятора и мешалки ($D_v = D_m$), то после ряда преобразований можно получить теоретическую зависимость частоты вращения лопастной мешалки от плотности дисперсной системы (вода-пылевая фракция) или коллоидного раствора (золя):

$$n = \frac{900 \cdot a \cdot \rho_v \cdot 2 \cdot D_v^2}{\pi^2 \cdot C_k \cdot S} \cdot \frac{1}{\rho_{ж}} = \frac{A_T}{\rho_{ж}}, \quad (4)$$

где обобщенный коэффициент частоты вращения мешалки A_T принят равным:

$$A_T = \frac{1800 \cdot a \cdot \rho_v \cdot D_v^2}{\pi^2 \cdot C_k \cdot S}.$$

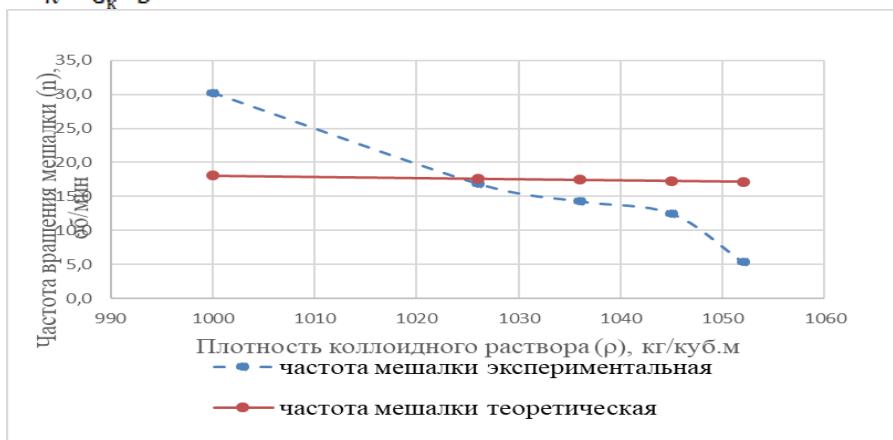


Рис. 3 – Сравнение теоретической зависимости и экспериментальных данных частоты вращения мешалки от плотности коллоидного раствора

Параметры A и B определяются эмпирически. В процессе поиска их величин по данным экспериментов сразу была исключена частота вращения мешалки n для последней точки при $= 1052 \text{ кг/м}^3$, которая давала «аномальный» результат, не подходящий под гиперболическую зависимость. Вероятно, это может быть связано с тем, что при значительной концентрации пыли в коллоидном растворе в действие вступают другие силы, например, Ван-дер-Ваальса или вязкого трения, для учета которых необходима другая математическая модель. На основании этого критической точкой плотности золя, при которой следует проводить замену водной фазы, можно считать $= 1045 \dots 1050 \text{ кг/м}^3$.

Для поиска эмпирических параметров A и B применим метод наименьших квадратов (МНК) и запишем уравнение для функции двух переменных, выражающей сумму квадратов отклонений:

$$F(A; B) = \sum_{i=1}^n \left(y_i - \left(\frac{A}{x_i} + B \right) \right)^2, \quad (6)$$

где $y_i = n_i$ – экспериментальная величина частоты вращения мешалки в текущей точке, об/мин; $x_i = \rho$ – зафиксированная плотность коллоидного раствора в текущий момент

времени, кг/м^3 ; n – число измерений.

Однако сравнение экспериментальных и расчетных данных показало их недостаточную сходимость (рис. 3). Теоретическая кривая представляет собой гиперболу, поведение графика, построенного по экспериментальным данным, также имеет участок, соответствующий гиперболе, что свидетельствует о совпадении качественной картины процесса.

Но для более точного его количественного описания необходимо уравнение (4) представить в виде, более близком к экспериментальным данным:

$$n = \frac{A}{\rho_{ж}} + B, \quad (5)$$

где n – частота вращения лопастей мешалки, мин^{-1} .

Найдем минимум функции двух переменных, предварительно записав частные производные:

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \sum_{i=1}^n \left[2 \left(y_i - \left(\frac{A}{x_i} + B \right) \right) \cdot \left(-\frac{1}{x_i} \right) \right] = \sum_{i=1}^n \left[2 \left(\frac{A}{x_i^2} + \frac{B}{x_i} - \frac{y_i}{x_i} \right) \right], \quad (7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial B} = \sum_{i=1}^n \left[2 \left(y_i - \left(\frac{A}{x_i} + B \right) \right) \right]. \quad (8)$$

Затем частные производные (7) и (8) приравняем к нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial A} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \left[2 \left(\frac{A}{x_i^2} + \frac{B}{x_i} - \frac{y_i}{x_i} \right) \right] = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial F}{\partial B} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \left[2 \left(y_i - \left(\frac{A}{x_i} + B \right) \right) \right] = 0. \quad (10)$$

После преобразований и сокращений получаем следующую систему:

$$\begin{cases} A \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} + B \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i}{x_i} \right) \\ A \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} + Bn = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (11)$$

Решаем её, используя данные оставшихся четырех контрольных точек, полученных в ходе экспериментов, и выводим уточненное уравнение математической модели с эмпирическими коэффициентами.

Анализ системы уравнений (11) показывает, что нас интересует величина сумм $\Sigma(1/x_i)$, $\Sigma(1/x_i)^2$ и $\Sigma(y_i/x_i)$. Их можно легко найти с использованием соответствующей таблицы в программе Excel (см. табл. 1).

Таблица 1 – Результаты расчета эмпирических коэффициентов методом наименьших квадратов

№ точ-ки	$x_i = \rho_{жi}$	$y_i = n_i$	$1/x_i$	$(1/x_i)^2$	y_i/x_i
1	1000	30,2	0,001	0,000001	0,0302
2	1026	16,9	0,000974659	$9,4996 \times 10^{-7}$	0,01647173
3	1036	14,3	0,000965251	$9,31709 \times 10^{-7}$	0,01380309
4	1045	12,5	0,000956938	$9,1573 \times 10^{-7}$	0,01196172
Сумма		74	0,003896848	$3,7974 \times 10^{-6}$	0,07243655

Таким образом уравнение (5) примет следующий вид:

$$n = \frac{423678,69}{\rho_{ж}} - 394,2778. \quad (13)$$

Графическое сравнение опытных данных с выведенным уравнением регрессии с эмпирическими коэффициентами показало, что сплошная линия, построенная на основании уравнения (13) с использованием метода наименьших квадратов (МНК), проходит внутри доверительного интервала

После подстановки искомых чисел система (11) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{A}{3,7974 \cdot 10^{-6}} + \frac{B}{0,003896848} = 0,07243655, \\ \frac{A}{0,003896848} + 4B = 74. \end{cases} \quad (12)$$

Решив эту систему методом Крамера, находим $A = 423678,69$; $B = -394,2778$.

экспериментальной кривой, ограниченного вертикальными отрезками (рис. 4). После расчета параметров корреляционного уравнения следует провести оценку его адекватности. Для этого используют коэффициент детерминации R^2 , который рассчитывают с использованием выборочной оценки значений соответствующих дисперсий:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}},$$

где SS_{res} – сумма квадратов остатков регрессии; SS_{tot} – общая сумма квадратов остатков.

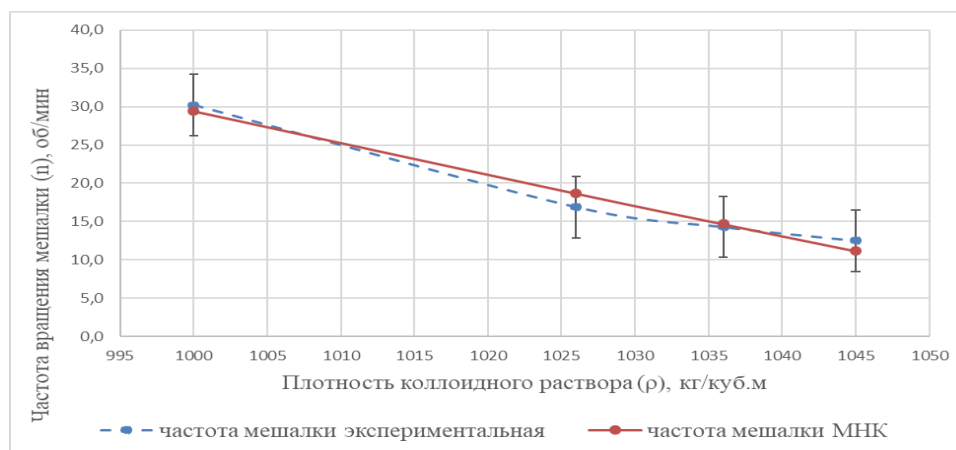


Рис. 4 – Сравнение экспериментальных данных и уравнения регрессии

Параметры формулы (14) можно рассчитать так:

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (15)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

где y_i – экспериментальные и расчетные значения объясняемой переменной; \bar{y} – среднее

арифметическое значение по экспериментальным значениям объясняемой переменной. Величина коэффициента детерминации модели ($R^2 = 0,9705$, табл. 2) превышает 0,95 и указывает на отличную сходимость расчетной формулы (13) с экспериментальными данными. Найденное уравнение регрессии проходит внутри доверительного интервала, который составляет $\pm 6,6807$, при стандартном уровне значимости $\alpha = 95\%$ и стандартной погрешности.

Таблица 2 – Результаты расчета коэффициента детерминации R^2

№ пункта	$y_i = n_i$	\hat{y}_i	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	30,2	29,4009	0,7991	0,6386	11,7250	137,4756
2	16,9	18,6644	-1,7644	3,1130	-1,5750	2,4806
3	14,3	14,6784	-0,3784	0,1432	-4,1750	17,4306
4	12,5	11,1563	1,3437	1,8055	-5,9750	35,7006
\bar{y}	18,475	Сумма		5,7003	-	193,0875
$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$						0,9705

Выводы. Таким образом, благодаря теоретическим исследованиям установлена гиперболическая зависимость частоты вращения лопастной мешалки от плотности коллоидного раствора

Однако она характерна только для плотности коллоидного раствора не более 1045... 1050 кг/м³, причем количественно

эмпирические результаты отличались от теоретических данных.

Величина коэффициента детерминации ($R^2 = 0,9705$) показала хорошую сходимость модели с экспериментальными данными.

Уравнения, выведенные для лабораторной установки, можно пересчитать на промышленный образец, используя теорию подобия.

Литература

1. Превентивная стратегия технического обслуживания дробильного оборудования / И. Х. Гималтдинов, Б. Г. Зиганшин, И. Г. Галиев и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15. № 3 (59). – С. 71-76.
2. Анализ и тенденции развития сельского хозяйства в условиях цифровизации / А. К. Субаева, М. Н. Калимуллин, М. М. Низамутдинов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17. – № 1(65). – С. 135-141. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-135-141.
3. Forecasting the production of agricultural machinery in the Russian Federation / V. V. Nosov, M. G. Tindova, K. A. Zhichkin [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : II International scientific and practical conference "Ensuring sustainable development in the context of agriculture, green energy, ecology and earth science", Smolensk, Russian Federation, 23–27 января 2022 года. – Smolensk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012014. – DOI 10.1088/1755-1315/1045/1/012014.
4. Определение рабочей площади торцевых решет дробилки зерна с увеличенной сепарирующей поверхностью / Б. Г. Зиганшин, С. Ю. Булатов, К. Е. Миронов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15. – № 2(58). – С. 87-91. – DOI 10.12737/2073-0462-2020-87-91.
5. The necessity for the introduction of innovative technologies in dairy animal production / F. Sitdikov, B. Ziganshin, R. R. Shaydullin, et al. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 14. – С. 69.
6. Файзуллин Р. А., Нуруллин Э. Г. Классификация пыли и способов ее отделения // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса. Научные труды Международ. науч.-практ. конф., посвящ. памяти д.т.н., проф. Мудрова П. Г. Казань: Казанский ГАУ, 2021. – С. 121-127.
7. К вопросу защиты окружающей среды от мелкодисперсной пыли горных предприятий / Г. В. Стась, С. З. Калаева, К. М. Муратова и др. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 1. – С. 92-109.
8. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system / M. O. Bineio, V. Faoro, O. A. Kathatourian, B. Ziganshin // Computers and Electronics in Agriculture. - 2019. - Т. 164. - S. 104923.
9. Разработка и исследование машины для воздушной очистки семян трав и зерна / П. А. Савиных, Ю. В. Сычугов, В. А. Казаков и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 84-89.
10. О необходимости модернизации всасывающе-нагнетательных дробилок зерна / В. И. Ширококов, Р. С. Байтуков, Е. В. Байтукова и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2014. – Т. 9. – № 4 (34). – С. 103-106.
11. Ширококов, В. И. Модернизированная дробилка фуражного зерна / В. И. Ширококов, А. Г. Иванов, О. С. Фёдоров // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. № 1. – С. 21-23.
12. Анализ конструкций пылеуловителей циклонного типа для мелкодисперсной пыли / Д. Р. Каплунов, С. З. Калаева, К. М. Муратова и др. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 2. – С. 49-71.
13. Василевский, М. В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 258 с.
14. Research in centrifugal rotary grinder of forage grain / P. Savinyh, A. Isupov, I. Ivanov, et al. // Engineering for Rural Development: "20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, ERD 2021 - Proceedings". - 2021. - S. 205-211.

15. Володко, А. М. Основы аэродинамики и динамики полета вертолетов / А. М. Володко. М.: Транспорт, 1988. – 341 с.

16. Шувалов, В. Н. Машины-автоматы и поточные линии. Л.: Машиностроение, 1973. – 543 с.

17. Файзуллин, М. И. Регрессионный анализ исследования процесса закрытого компостирования подстилочного навоза методом искусственной аэрации / М. И. Файзуллин, А. Г. Иванов, Ю. Г. Корепанов // Известия ФГБОУ ВО СПГАУ. – 2019. – № 55. URL: <http://spbgau.ru/files/nid/7911/55-izvestiya.pdf> (дата обращения 25.05.2022 г.)

Сведения об авторах:

Иванов Алексей Генрихович – кандидат технических наук, доцент, ivalgen@inbox.ru

Широбокров Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, vlh@yandex.ru

Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск, Россия

Калимуллин Марат Назипович – доктор технических наук, профессор, marat-kmn@yandex.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.

THE DEPENDENCE OF THE ROTATION FREQUENCY OF THE BLADES OF THE WET DUST COLLECTOR AGITATOR ON THE DENSITY OF THE LIQUID

A.G. Ivanov, V.I. Shirobokov, M.N. Kalimullin

Abstract. One of the undesirable factors when grinding grain with hammer crushers is the formation of flour dust, which is fire and explosive, as well as harmful to the health of service personnel. The applied fabric dust collectors ineffectively purify the air coming out of the pneumatic system of the crusher. One of the directions of development of dust collection equipment is the development of wet dust collectors or the improvement of existing ones. The proposed two-stage wet dust collector gives greater efficiency of air purification from dust, which is shown by laboratory studies. One of the factors affecting the quality of cleaning is the speed of rotation of the agitator blade, which varies depending on the concentration of dust in the liquid of the first stage. Not the entire dust-air mixture passes through the upgraded dust collector, but only the part that is redundant. This allows you to increase the life of the dust collector before the next service. The aim of the work is to study the dependence of the rotation speed of the blade of the agitator of the first stage of the dust collector on the density of the liquid. Methods of mathematical modeling of the agitator operation, approximation and regression analysis were used for the research, correlation analysis was performed. Theoretical studies have revealed a hyperbolic dependence of the rotation frequency of the paddle agitator on the density of the colloidal solution, however, experimental data provided other quantitative indicators. To determine the necessary parameters of the equation, the least squares method was used to approximate the experimental data. The calculated data obtained were compared with the experimental ones by the coefficient of determination, and the model was highly adequate, $R^2 = 0,9705$. The presented method of selecting the regression equation shows good convergence with the experiment. The equations derived for a laboratory installation can be converted to an industrial design using the theory of similarity.

Key words: crusher, pneumatic system, dust collector, analysis, dust concentration, density, efficiency.

References

1. Preventive strategy of crushing equipment maintenance / I. H. Gimaltdinov, B. G. Ziganshin, I. G. Galiev [i dr.] // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – Т. 15. № 3 (59). – С. 71-76.

2. Analysis and trends in the development of agriculture in the context of digitalization / A. K. Subaeva, M. N. Kalimullin, M. M. Nizamutdinov [i dr.] // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – Т. 17. – № 1 (65). – С. 135-141. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-135-141.

3. Forecasting the production of agricultural machinery in the Russian Federation / V. V. Nosov, M. G. Tindova, K. A. Zhichkin [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : II International scientific and practical conference "Ensuring sustainable development in the context of agriculture, green energy, ecology and earth science", Smolensk, Russian Federation, January 23–27, 2022. - Smolensk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2022. - P. 012014. - DOI 10.1088/1755-1315/1045/1/012014.

4. Determination of the working area of the end screens of the grain crusher with an increased separating surface / B. G. Ziganshin, S. YU. Bulatov, K. E. Mironov [i dr.] // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – Т. 15. – № 2(58). – С. 87-91. – DOI 10.12737/2073-0462-2020-87-91.

5. The necessity for the introduction of innovative technologies in dairy animal production / F. Sitdikov, B. Ziganshin, R. R. Shaydullin, A. Moskvicheva // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. –Т. 14. – С. 69.

6. Fajzullin, R. A. Classification of dust and methods of its separation / R. A. Fajzullin, E. G. Nurullin // Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya tekhnicheskoy bazy agropromyshlennogo kompleksa. Nauchnye trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati d.t.n., prof. Mudrova P. G.– FGBOU VO Kazanskij GAU, 2021. – С. 121-127.

7. On the issue of environmental protection from fine dust of mining enterprises / G. V. Stas', S. Z. Kalaeva, K. M. Muratova i dr. // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. – 2019. – № 1. – С. 92-109.

8. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system / M. O. Bine-lo, V. Faoro, O. A. Kathaturian, B. Ziganshin // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Т. 164. – С. 104923.

9. Development and research of a machine for air cleaning of grass seeds and grain / P. A. Savinyh, YU. V. Sychugov, V. A. Kazakov i dr. // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – Т. 16. – № 1 (61). – С. 84-89.

10. On the need to modernize the suction and injection crushers of grain / V. I. SHirobokov, R. S. Bajtukov, E. V. Bajtukova i dr. // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – Т. 9. – № 4 (34). – С. 103-106.

11. Shirobokov V.I. Upgraded Feed Grain Crusher / V. I. SHirobokov, A. G. Ivanov, O. S. Fyodorov // Traktory i sel'hozmashiny. – 2010. № 1. – С. 21-23.

12. Analysis of cyclone-type dust collectors designs for fine dust / D. R. Kaplunov, S. Z. Kalaeva, K. M. Muratova i dr. // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. – 2018. – № 2. – С. 49-71.

13. Vasilevskij, M. V. Dedusting of gases by inertial devices: monograph. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2008. – 258 s.

14. Research in centrifugal rotary grinder of forage grain / P. Savinyh, A. Isupov, I. Ivanov, et al. // Engineering for Rural Development: "20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, ERD 2021 - Proceedings". – 2021. – С. 205-211.

15. Volodko, A. M. Fundamentals of aerodynamics and dynamics of helicopter flight / A. M. Volodko. - M. : Transport, 1988. - 341,[1] s. : il.; 22 sm.; ISBN 5-277-00018-6.

16. SHuvalov V.N. Automatic machines and production lines / V. N. SHuvalov – L.: Mashinostroenie, 1973. – 543 s.

17. Fajzullin, M. I. Regression analysis of the study of the process of closed composting of litter manure by artificial aeration / M. I. Fajzullin, A. G. Ivanov, YU. G. Korepanov // Izvestiya FGBOU VO SPGAU. 2019. № 55. URL: <http://spbgau.ru/files/nid/7911/55-izvestiya.pdf> (data obrashcheniya 25.05.2022 g.)

Authors:

Ivanov Aleksey Genrikhovich – Ph.D. of Technical sciences, associate professor, ivalgen@inbox.ru

Shirobokov Vladimir Ivanovich – Ph.D. of Technical sciences, associate professor, vlh@yandex.ru

Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia

Kalimullin Marat Nazipovich - Doctor of Technical sciences, professor, marat-kmn@yandex.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.