Научная статья
УДК 631.3
doi:10.35694/YARCX.2023.63.3.012

НЕОБХОДИМЫЙ МОМЕНТ ДЛЯ ВРАЩЕНИЯ ВНЕШНЕГО ЦИЛИНДРА И ВНУТРЕННЕГО ЦИЛИНДРА С ЗЕРНОМ ПРИ ЕГО СУШКЕ В УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ РОТОРНОЙ СУШИЛКЕ

Владимир Анатольевич Николаев
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия
nikolaev53@inbox.ru, ORCID 0000-0001-7503-6612

Реферат. В структуре финансовых затрат на производство зерна в Нечернозёмной зоне России существенную долю занимают расходы для осуществления его сушки. Во-первых, влажность поступающего на сушку зерна бывает до 33%. Для её уменьшения до 15% нужно большое количество дорогостоящего топлива. Во-вторых, время эксплуатации сушилок в течение года не более полутора месяцев. Большие затраты на покупку и монтаж сушильно-сортировальных комплексов в остальное время ничем не оправданы. В-третьих, существующие сушильно-сортировальные комплексы сложно использовать для сушки других материалов, кроме зерна. Для уменьшения влияния указанных недостатков предложена полуавтоматическая универсальная роторная сушилка. Так как конструкция полуавтоматической универсальной роторной сушилки имеет существенные отличия от сушилок, используемых в настоящее время, необходима разработка теории загрузки, выгрузки и сушки различных материалов, в частности зерна. В результате исследования взаимодействия между зерном пшеницы и внешним цилиндром, внутренним цилиндром, между которыми располагается зерно в полуавтоматической роторной сушилке, выявлены параметры этого взаимодействия. Определена мощность, необходимая для привода внешних цилиндров и внутренних цилиндров, необходимый вращающий момент. Необходимый вращающий момент при сушке других культур меньше, так как меньше их объёмная масса.

Ключевые слова: *универсальная полуавтоматическая роторная сушилка, зерно, сушка зерна, мощность, вращающий момент*

REQUIRED TORQUE FOR ROTATION OF OUTER CYLINDER AND INNER CYLINDER WITH GRAIN DURING ITS DRYING IN UNIVERSAL SEMI-AUTOMATIC ROTARY DRYER

Vladimir A. Nikolaev
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia
nikolaev53@inbox.ru, ORCID 0000-0001-7503-6612

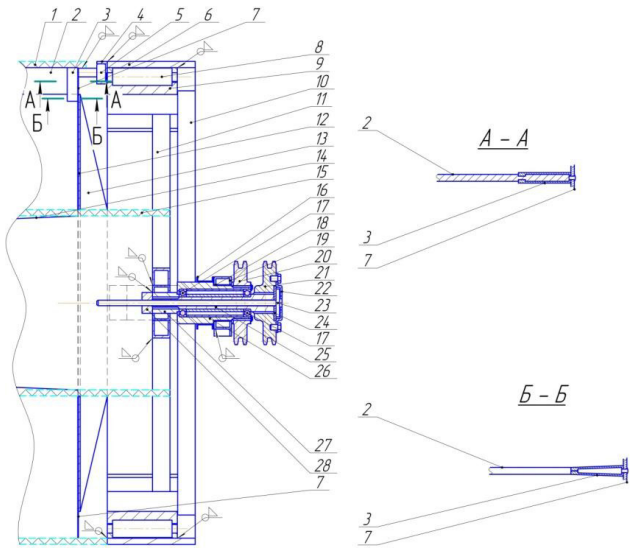
Abstract. In the structure of financial costs for the production of grain in the Non-chernozem zone of Russia, a significant share is occupied by the costs of drying it. Firstly, the moisture content of grain supplied for drying is up to 33%. To reduce it to 15%, you need a large amount of expensive fuel. Secondly, the operation time of dryers for a year does not exceed one and a half months. Large costs for the purchase and installation of drying and sorting complexes are not justified at all other times. Third, existing drying and sorting complexes are difficult to use for drying materials other than grain. In order to reduce the influence of the above disadvantages, a semi-automatic universal rotary dryer has been proposed. Since the design of the semi-automatic universal rotary dryer has significant differences from the currently used dryers, the theory of loading, unloading and drying of various materials, in particular grain, needs to be developed. As a result of analysis of interaction between wheat grain and outer cylinder, inner cylinder between which grain is located in semi-automatic rotary dryer, parameters of this interaction were revealed. Power required to drive outer cylinders and inner cylinders, required torque were determined. The required torque when drying other crops is less, since their volume weight is less.

Keywords: *universal semi-automatic rotary dryer, grain, grain drying, power, torque*

Введение. Проблему энергосбережения при сушке зерна рассматривали многие авторы [1; 2; 3; 4; 5]. Полуавтоматическая универсальная роторная сушилка [6] предназначена для качественной энергосберегающей сушки различных сельскохозяйственных материалов, в частности зерна. Внутри каждого внешнего цилиндра посредством лучей внутреннего цилиндра установлен перфорированный внутренний цилиндр с конусом (рис. 1). Для обеспечения необходимой прочности в сочетании с перфорацией стенки наружного цилиндра и внутреннего цилиндра выполнены в виде сот. Жёсткость им придают планки внешнего цилиндра и планки внутреннего цилиндра.

Торцы внешних цилиндров 1 закрыты дисками 12, которые с косынками 13 надеты с обеих сторон на каждый внутренний цилиндр 15.

На планки каждого внешнего цилиндра 2 с обеих сторон посредством зажимов 3 устанавливают уплотнительные полукольца 7. Они прижаты к дискам и обеспечивают с обеих сторон уплотнение пространства между внешним цилиндром и внутренним цилиндром. Скоба 22, винт 23, шайба 24 и гайка 28 служат для монтажа и демонтажа внутреннего цилиндра.



1 – внешний цилиндр; 2 – планка внешнего цилиндра; 3 – зажим; 4 – направляющая; 5 – ролик крышки; 6 – обойма внешнего цилиндра; 7 – уплотнительное полукольцо; 8 – ролик внутренний; 9 – обойма внутреннего цилиндра; 10 – луч внешнего цилиндра; 11 – луч внутреннего цилиндра; 12 – диск; 13 – косынка; 14 – конус; 15 – внутренний цилиндр; 16 – кольцо уплотнительное; 17 – подшипник; 18 – подшипник скольжения; 19 – ротор; 20 – звёздочка привода внешнего цилиндра; 21 – звёздочка привода внутреннего цилиндра; 22 – скоба; 23 – винт; 24 – шайба; 25 – вал привода внутреннего цилиндра; 26 – вал привода внешнего цилиндра; 27 – ступица; 28 – гайка.

Рисунок 1 – Схема привода внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра

Если фиксатор внутреннего цилиндра соединил между собой луч внешнего цилиндра 10 и луч внутреннего цилиндра 11, внешний и внутренний цилиндры вращаются как одно целое. Вращающий момент поступает только на звёздочку привода внешнего цилиндра 20, от неё на вал привода внешнего цилиндра 26, который вращается в роторе 19 на подшипнике скольжения 18, на луч внешнего цилиндра, луч внутреннего цилиндра, затем на внешний и внутренний цилиндры. Кольцо уплотнительное 16 служит для уплотнения задней стенки камеры нагрева при повороте ротора.

Если фиксатор внутреннего цилиндра разъединил между собой луч внешнего цилиндра и луч внутреннего цилиндра, внешний и внутренний цилиндры вращаются автономно. Вращающий момент поступает как на звёздочку привода внешнего цилиндра, так и на звёздочку привода внутреннего цилиндра 21. От неё вращающий момент через вал привода внутреннего цилиндра 25, вращающийся в подшипниках 17, ступицу 27, луч внутреннего цилиндра поступает на внутренний цилиндр. Он вращается, опираясь через обойму внутреннего цилиндра 9, ролик внутренний 8 на обойму внешнего цилиндра 6. Внешние цилиндры закрыты крышками внешних цилиндров. Внешние цилиндры приводит во вращение электродвигатель привода внешних цилиндров, а внутренние цилиндры – электродвигатель привода внутренних цилиндров посредством цепей привода.

Из конструктивной компоновки [6] универсальной полуавтоматической роторной сушилки получены базовые размеры. Среди них:

– диаметр траектории перемещения осей внешних цилиндров 4000 мм;

– диаметр наружной стенки внешнего цилиндра 1390 мм;

– диаметр внутренней стенки внешнего цилиндра 1354 мм;

– диаметр наружной стенки внутреннего цилиндра 536 мм;

– диаметр внутренней стенки внутреннего цилиндра 500 мм;

– диаметр внутренней стенки теплообменника 600 мм.

Длина рабочей части внешнего цилиндра $l_ц = 6\,м$. Если бы при загрузке зерно заполняло весь объём между внешним цилиндром и внутренним цилиндром, то его объём

$$V_ц = 3{,}14 \cdot \left[\left(\frac{1{,}354}{2}\right)^2 - \left(\frac{0{,}536}{2}\right)^2\right] \cdot 6 \approx 7{,}28\,м^3.$$

Необходимый момент для вращения внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра с зерном при его сушке в универсальной полуавтоматической роторной сушилке

Однако часть этого объёма займёт крышка внешнего цилиндра, которая при открытии смещается внутрь внешнего цилиндра, часть объёма занимают пять планок внешнего цилиндра и шесть планок внутреннего цилиндра, часть объёма не следует заполнять, чтобы не было потерь зерна от переполнения. Площади сечений этих частей определим из чертежа (рис. 2).

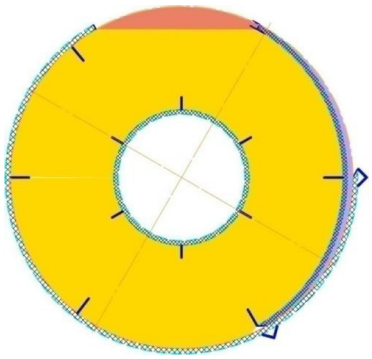


Рисунок 2 – Сечение внешнего цилиндра при открытой крышке внешнего цилиндра

Из чертежа площади сечений, занимаемых: крышкой внешнего цилиндра $46300\ мм^2$, планками внешнего цилиндра $5 \times 300 = 1500\ мм^2$, планками внутреннего цилиндра $6\times 200 = 1200\ мм^2$, не заполненными зерном, объёмом $41000\ мм^2$. Общая площадь:

$$46300 + 1500 + 1200 + 41000 =$$

$$= 90000\ мм^2 = 0{,}09\ м^2.$$

Объём между внешним цилиндром и внутренним цилиндром, не заполняемый зерном, $V_ц = 0{,}09 \cdot 6 = 0{,}54\ м^3$. Объём между внешним цилиндром и внутренним цилиндром, заполняемый зерном,

$$V_з = V_ц - V_{ц-}; V_з = 7{,}28 - 0{,}54 = 6{,}74\ м^3.$$

Для расчёта примем: объёмную массу сырой пшеницы $\rho_п = 850\ кг/м^3$ при скважности 40%; объёмную массу ржи $\rho_р = 750\ кг/м^3$ при скважности 40%; объёмную массу ячменя $\rho_я = 700\ кг/м^3$ при скважности 50%; объёмную массу овса $\rho_о = 550\ кг/м^3$ при скважности 60%. Тогда в пространстве между большим и малым цилиндрами масса пшеницы:

$m_п = V_з\rho_п; m_п = 6{,}74 \cdot 850 = 5729 \approx 5730\ кг;$

ржи – $m_п = 6{,}74 \cdot 750 = 5055 \approx 5050\ кг;$

ячменя – $m_п = 6{,}74 \cdot 700 = 4718 \approx 4720\ кг;$

овса – $m_п = 6{,}74 \cdot 550 = 3707 \approx 3700\ кг.$

Выгрузку высушенного материала производят внутрь ротора на транспортёр выгрузки из внешнего цилиндра, когда он расположен в положении 1, то есть в верхнем положении [7; 8]. В положении 1 производят также загрузку следующей порции зерна. В результате анализа взаимодействия высушиваемого сыпучего материала с элементами универсальной полуавтоматической роторной сушилки выявлены кинематические, динамические и энергетические параметры элементов конструкции, осуществляющих загрузку и выгрузку [9].

После загрузки зерна или другого сыпучего материала начинается его сушка. При сушке внешний цилиндр и внутренний цилиндр вращаются как одно целое. При совместном вращении внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра, пространство между которыми заполнено зерном, происходит его пересыпание, когда угол наклона поверхности зерна превысит угол его естественного откоса. Угол естественного откоса сырого зерна около 45°. По мере высыхания угол его естественного откоса уменьшается приблизительно до 30°.

Методика. Методом построения определим площадь сечения пересыпаемого зерна. Предположим, что зерно, при совместном вращении внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра, ежесекундно поднимается над горизонталью, проходящей через точку *А* (рис. 3) на высоту $h_п$ подъёма центра масс зерна.

Когда угол естественного откоса 45°, площадь сечения зерна, ежесекундно поднимаемого над горизонталью, заключена в выделенном секторе: $S_з = 4360\ мм^2$. Длина рабочей части внешнего цилиндра $l_ц = 6\ м$. Объём ежесекундно поднимаемого зерна при вращении внешнего цилиндра:

$$V_з = S_з l_ц; V_з = 0{,}004360 \cdot 6 \approx 0{,}026\ м^3.$$

Если рассматривать строго, объём зерна в процессе сушки уменьшается. Следовательно, несколько уменьшается и объём поднимаемого зерна при вращении внешнего цилиндра. Поскольку на изменение объёма зерна при сушке влияет много трудноучитываемых факторов, а объём поднимаемого зерна при вращении внешнего цилиндра в процессе сушки изменяется незначительно, его в расчёте не будем учитывать.

Объёмная масса сырой пшеницы принята $\rho_п = 850\ кг/м^3$, после сушки – $\rho_{с\,п} = 750\ кг/м^3$. Предположим, в процессе сушки она изменяется линейно, пропорционально изменению угла естественного откоса. Линейно будет изменяться и масса $m_п$ зерна, поднимаемого в секунду. Когда угол естественного откоса 45°, высота подъёма центра масс зерна $h_п = 0{,}268\ м$. При подъёме зерна за счёт вращения внешнего цилиндра изменится его потенциальная энергия:

$$e_п = m_п g h_п. \qquad (1)$$

Здесь $e_п$ – потенциальная энергия зерна в секунду, то есть необходимая мощность для синхронного вращения внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра без учёта трения в подшипниках. Допустим, оно увеличивает необходимую мощность на

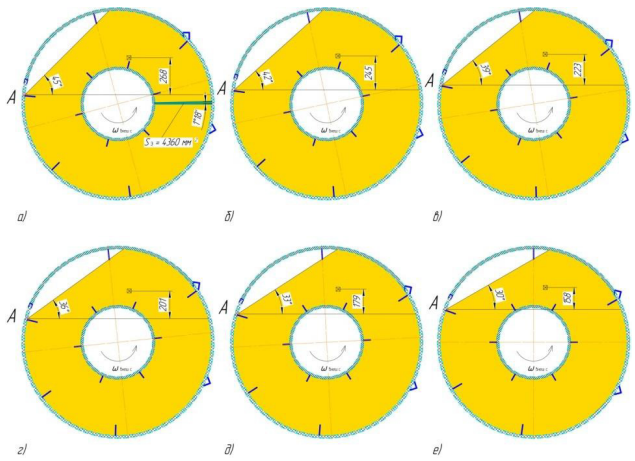


Рисунок 3 – К определению площади сечения зерна, которого ежесекундно поднимают над горизонталью внешний цилиндр и внутренний цилиндр при совместном вращении, и высоты подъёма центра масс зерна, если угол естественного откоса пшеницы: а) 45°; б) 42°; в) 39°;г) 36°; д) 33°; е) 30°

10% от расчётной. Угловая скорость цилиндров при сушке [8] $\omega_{внеш\,c} = 0{,}023\ рад/с \approx 1{,}3\ град/с$. Необходимый момент для вращения цилиндра:

$$M_{в\,ц} = \frac{1{,}1 \cdot e_n}{\omega_{внеш\,c}}. \qquad (2)$$

Результаты. В таблице 1 представлены результаты расчёта параметров.

На рисунке 4 представлена зависимость высоты подъёма центра масс зерна от угла естественного откоса, на рисунке 5 – зависимость массы поднимаемого зерна в секунду за счёт синхронного вращения внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра от угла естественного откоса зерна.

На рисунке 6 представлена зависимость мощности, необходимой для подъёма зерна, от угла естественного откоса, на рисунке 7 – зависимость вращающего момента, необходимого для подъёма зерна, от угла естественного откоса зерна. Результаты аппроксимации на полях графиков.

После загрузки высушиваемого материала ротор совместно с внешними и внутренними цилиндрами поворачивают циклично из одного положения в другое [6]. В положении 2 происходит снятие с высушиваемого материала поверхностной влаги путём его продувки подогретым воздухом, нагнетаемым вентилятором нагрева. Подогретый воздух поступает во внутренний цилиндр, проходит через его перфорированные стенки, пронизывает высушиваемый сыпучий материал и выходит наружу через перфорированные стенки внешнего цилиндра. В положениях 3, 4, 5 производят нагрев высушиваемого материала горячим воздухом в камере нагрева, в которую подают агент сушки от теплогенераторов. Путь горячего воздуха такой же, как и подогретого воздуха. В положении 6 – холодным воздухом охлаждают зерно. Засасываемый вентилятором охлаждения наружный воздух проходит через перфорированные стенки внешнего цилиндра, охлаждаемый материал, перфорированные стенки внутреннего цилиндра и выходит в трубу.

Если допустить, что зерно пшеницы, расположенное между внешним и внутренним цилиндрами в положении 2, находится под углом естественного откоса 45°, в положении 3 – под углом естественного откоса 42°, в положении 4 – под углом естественного откоса 39°, в положении 5 – под углом естественного откоса 36°, в положении 6 – под углом естественного откоса 33°, то мощность привода синхронного вращения пяти внешних цилиндров и внутренних цилиндров составляет около 254 Вт, необходимый вращающий момент – 11070 Нм. Необходимый вращающий момент при сушке других культур меньше, так как меньше их объёмная масса.

Вывод. Мощность привода синхронного вращения пяти внешних цилиндров и пяти внутренних цилиндров невелика, поэтому, с учётом трудноопределимых факторов, для привода вращения внешних цилиндров и внутренних цилиндров следует применить электродвигатели АИР 63 В6 0,25; угловая скорость вала 102 рад/с. Поскольку угло-

Таблица 1 – Результаты расчёта параметров при синхронном вращении внешнего и внутреннего цилиндров универсальной полуавтоматической роторной сушилки

Угол естественного откоса, град	Объём поднимаемого зерна, куб. м	Объёмная масса поднимаемого зерна, кг/куб м	Масса поднимаемой пшеницы, кг/с	Высота подъёма центра масс, м	Мощность с учётом трения, Вт	Необходимый вращающий момент, Н·м
45	0,026	850	22,1	0,268	63	2776
42	0,026	830	21,58	0,245	57	2478
39	0,026	810	21,06	0,223	50,6	2201
36	0,026	790	20,54	0,201	44,5	1935
33	0,026	770	20,02	0,179	38,6	1680
30	0,026	750	19,5	0,158	33,2	1444

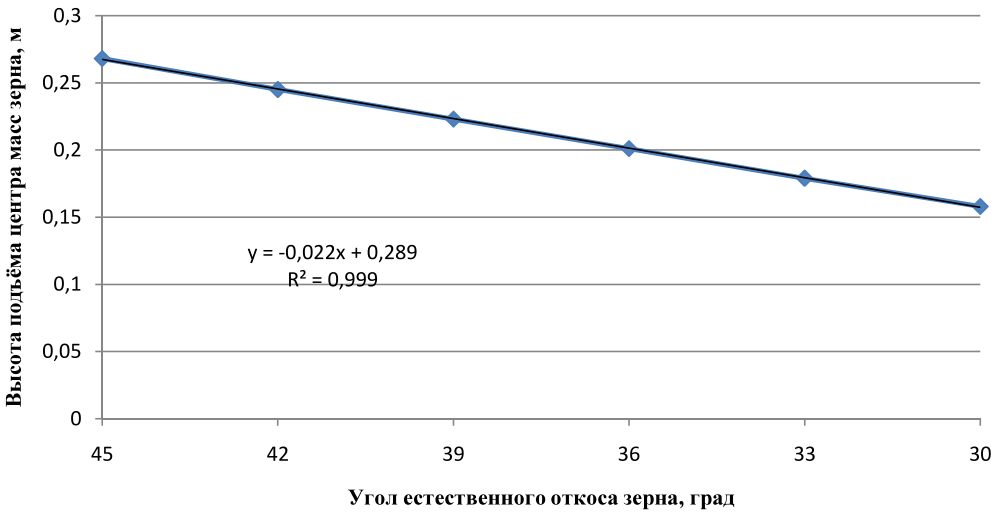


Рисунок 4 – Зависимость высоты подъёма центра масс зерна от угла естественного откоса

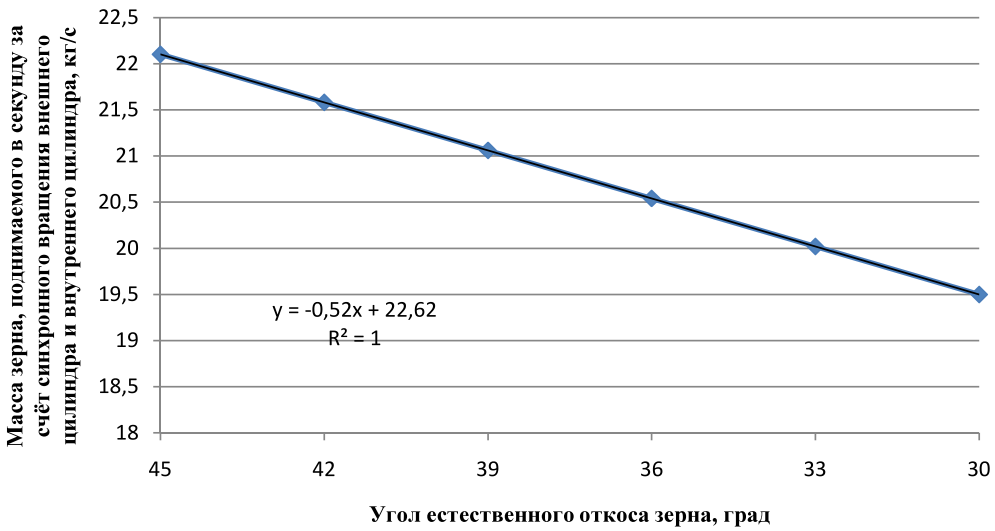


Рисунок 5 – Зависимость массы поднимаемого зерна в секунду от угла естественного откоса зерна

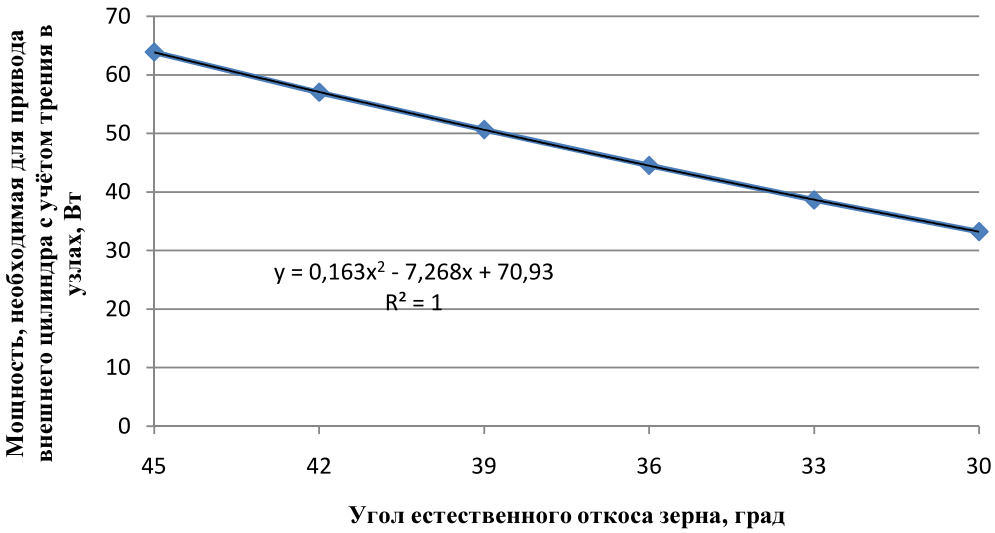


Рисунок 6 – Зависимость мощности, необходимой для подъёма зерна и преодоления трения в узлах, от угла естественного откоса зерна

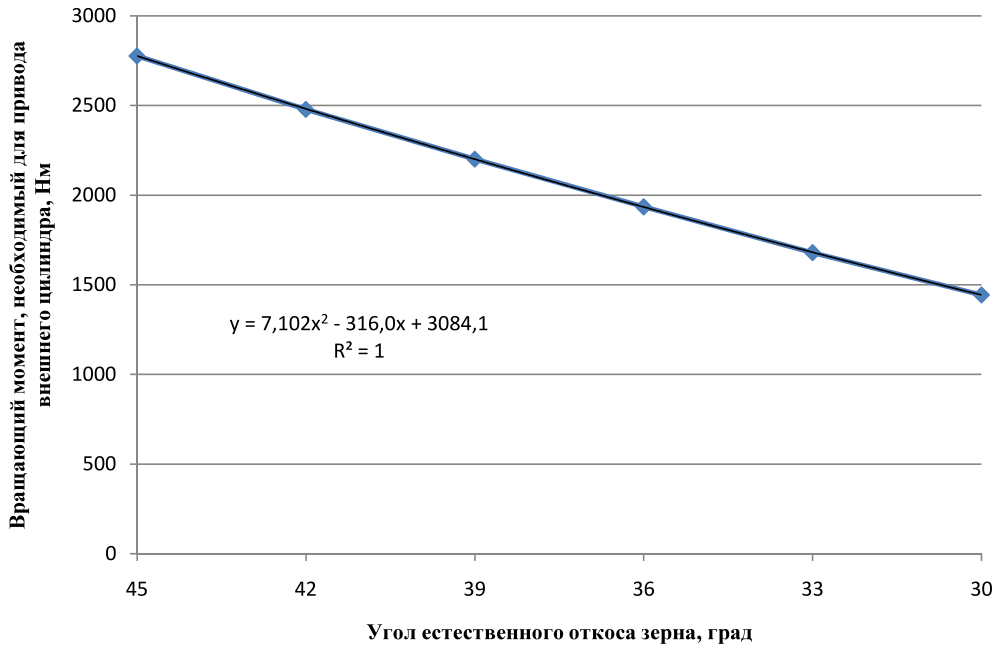


Рисунок 7 – Зависимость вращающего момента, необходимого для подъёма зерна, от угла естественного откоса зерна

вая скорость цилиндров при сушке очень мала, в конструкции универсальной полуавтоматической роторной сушилки предусмотрены редукторы с большим передаточным отношением. Так как необходимый вращающий момент большой, предусмотрены двойные цепи приводов (см. рис. 1).

Список источников

1. Голубкович А. В., Павлов С. А., Марин Р. А., Дадыко А. Н. Сушка зерна с использованием топок на твердом топливе // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 6. С. 9–15. ISSN 0321-4443.

2. Елизаров В. П., Павлов С. А., Марин Р. А., Дадыко А. Н. Сушка зерна с переменным теплоподводом в колонковой зерносушилке // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 12. С. 24–25. ISSN 0321-4443.

3. Цугленок Н. В., Манасян С. К., Конусов Н. Н. Функциональное описание процесса сушки зерна // Вестник КрасГАУ. 2005. № 8. С. 217–221. ISSN 1819-4036.

4. Алиакберов И. И., Галиуллин Ш. Р. К тепловому расчету зерносушилок барабанного типа // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2009. Т. 4, № 4 (14). С. 144–149. ISSN 2073-0462.

5. Алтухова Т. А., Алтухов С. В., Шуханов С. Н. Модернизация сушилки зернистых материалов // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 2. С. 149–153. DOI 10.17816/0321-4443-100577.

6. Пат. 2631586 Российская Федерация, МПК F26B 15/04 (2006.01), F26B 20/00 (2006.01) Полуавтоматическая роторная сушилка / В. А. Николаев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия». № 2016123868; заявл. 15.06.2016; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 27. 2 с.

7. Николаев В. А. Расчёт загрузки зерна элементами универсальной полуавтоматической роторной сушилки // Вестник АПК Верхневожья. 2022. № 3 (59). С. 88–94. DOI 10.35694/YARCX.2022.59.3.012.

8. Николаев В. А. Выгрузка зерна из универсальной полуавтоматической роторной сушилки // Вестник АПК Верхневожья. 2022. № 4 (60). С. 100–105. DOI 10.35694/YARCX.2022.60.4.012.

9. Николаев В. А. Время выгрузки и загрузки зерна в универсальную полуавтоматическую роторную сушилку // Вестник АПК Верхневожья. 2023. № 2 (62). С. 89–93. DOI 10.35694/YARCX.2023.62.2.014.

References

1. Golubkovich A. V., Pavlov S. A., Marin R. A., Dadyko A. N. Sushka zerna s ispol'zovaniem topok na tverdom toplive // Traktory i sl'hozmashiny. 2017. № 6. S. 9–15. ISSN 0321-4443.

2. Elizarov V. P., Pavlov S. A., Marin R. A., Dadyko A. N. Sushka zerna s peremennym teplopodvodom v kolonkovoj zernosushilke // Traktory i sel'hozmashiny. 2015. № 12. S. 24–25. ISSN 0321-4443.

3. Cuglenok N. V., Manasyan S. K., Konusov N. N. Funkcional'noe opisanie processa sushki zerna // Vestnik KrasGAU. 2005. № 8. S. 217–221. ISSN 1819-4036.

Необходимый момент для вращения внешнего цилиндра и внутреннего цилиндра с зерном при его сушке в универсальной полуавтоматической роторной сушилке

4. Aliakberov I. I., Galiullin Sh. R. K teplovomu raschetu zernosushilok barabannogo tipa // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2009. T. 4, № 4 (14). S. 144–149. ISSN 2073-0462.

5. Altuhova T. A., Altuhov S. V., Shuhanov S. N. Modernizaciya sushilki zernistyh materialov // Traktory i sel'hozmashiny. 2022. T. 89, № 2. S. 149–153. DOI 10.17816/0321-4443-100577.

6. Pat. 2631586 Rossijskaya Federaciya, MPK F26B 15/04 (2006.01), F26B 20/00 (2006.01) Poluavtomaticheskaya rotornaya sushilka / V. A. Nikolaev ; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO «Yaroslavskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya». № 2016123868; zayavl. 15.06.2016; opubl. 25.09.2017, Byul. № 27. 2 s.

7. Nikolaev V. A. Raschyot zagruzki zerna elementami universal'noj poluavtomaticheskoj rotornoj sushilki // Vestnik APK Verhnevozh'ya. 2022. № 3 (59). S. 88–94. DOI 10.35694/YARCX.2022.59.3.012.

8. Nikolaev V. A. Vygruzka zerna iz universal'noj poluavtomaticheskoj rotornoj sushilki // Vestnik APK Verhnevozh'ya. 2022. № 4 (60). S. 100–105. DOI 10.35694/YARCX.2022.60.4.012.

9. Nikolaev V. A. Vremya vygruzki i zagruzki zerna v universal'nuyu poluavtomaticheskuyu rotornuyu sushilku // Vestnik APK Verhnevozh'ya. 2023. № 2 (62). S. 89–93. DOI 10.35694/YARCX.2023.62.2.014.

Сведения об авторе

Владимир Анатольевич Николаев – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных и дорожных машин, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет», spin-код: 8865-0397.

Information about the author

Vladimir A. Nikolaev – Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Construction and Road Machines, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Technical University", spin-code: 8865-0397.

Официальный сайт
ФГБОУ ВО «Ярославский ГАУ»:

www.yaragrovuz.ru

РУБРИКИ САЙТА:

Сведения об образовательной организации –
– Агросоветник – Образование – Абитуриенту –
– Наука и международная деятельность
(в том числе научный журнал «Вестник АПК Верхневолжья») –
– Дополнительное образование – Факультеты

Все выпуски журнала «Вестник АПК Верхневолжья» в полнотекстовом формате,
требования к оформлению рукописей, контакты на страничке:
http://yaragrovuz.ru/index.php/nauka-i-mezhdunarodnaya-deyatelnost/zhurnal-vestnik-apk-vekhnevolzhya