

Научная статья  
УДК 631.3  
doi:10.35694/YARCX.2022.59.3.012

## РАСЧЁТ ЗАГРУЗКИ ЗЕРНА ЭЛЕМЕНТАМИ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ РОТОРНОЙ СУШИЛКИ

**Владимир Анатольевич Николаев**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия  
nikolaev53@inbox.ru

**Реферат.** Распространённым видом подлежащего сушке материала является зерно и другие сыпучие материалы. Работа элементов универсальной полуавтоматической роторной сушилки во время загрузки, в частности, зерна должна быть синхронизирована. Для этого необходимо определить кинематические, динамические и энергетические параметры элементов универсальной полуавтоматической роторной сушилки при загрузке зерна или других сыпучих материалов. Разработана методика определения кинематических, динамических и энергетических параметров элементов универсальной полуавтоматической роторной сушилки при загрузке зерна или других сыпучих материалов. В результате анализа взаимодействия высушиваемого сыпучего материала с элементами универсальной полуавтоматической роторной сушилки выявлены кинематические, динамические и энергетические параметры элементов конструкции, осуществляющих загрузку.

*Ключевые слова:* элементы универсальной полуавтоматической роторной сушилки, зерно, кинематические параметры, динамические параметры, энергетические параметры

## CALCULATION OF GRAIN LOADING BY ELEMENTS OF UNIVERSAL SEMI-AUTOMATIC ROTARY DRYER

**Vladimir A. Nikolaev**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia  
nikolaev53@inbox.ru

**Abstract.** A common type of material to be dried is grain and other bulk materials. The operation of the elements of the universal semi-automatic rotary dryer during loading, in particular grain, must be synchronized. To do this, it is necessary to determine the kinematic, dynamic and energy parameters of the elements of the universal semi-automatic rotor dryer when loading grain or other bulk materials. A method has been developed for determining kinematic, dynamic and energy parameters of elements of a universal semi-automatic rotor dryer when loading grain or other bulk materials. As a result of analysis of interaction of dried bulk material with elements of universal semi-automatic rotor dryer, kinematic, dynamic and energy parameters of elements of structure carrying out loading are revealed.

*Keywords:* elements of universal semi-automatic rotor dryer, grain, kinematic parameters, dynamic parameters, energy parameters

**Введение.** Основной причиной высоких затрат на производство зерна в Нечернозёмной зоне Российской Федерации являются большие затраты энергии на его сушку. Это обусловлено как дороговизной сушильно-сортировальных комплексов, так и ограниченным периодом их эксплуатации в течение года. Чтобы использовать сушилку в течение всего года, она должна быть универсальной, то есть качественно сушить без существенной переналадки все материалы и изделия сельскохозяйственного и подсобного производства.

Универсальная сельскохозяйственная сушилка должна быть высокомеханизированной. Она должна обеспечивать загрузку и выгрузку всех высушиваемых материалов. Сушилка сельскохозяйственных материалов является сложным устройством. Чтобы обеспечить её надёжное функционирование как в периоды загрузки и выгрузки, так и в периоды сушки необходима высокая степень автоматизации. Оператор сушилки должен лишь устанавливать режим сушки и контролировать функционирование автоматизированной системы сушилки.

Теорию сушки и конструкции сушилок сельскохозяйственного назначения разрабатывали авторы [1; 2; 3; 4]. Однако, несмотря на разнообразие конструкций, создать сушилку, соответствующую указанным требованиям, пока не удавалось. Для качественной сушки сельскохозяйственных материалов и изделий сельскохозяйственного и подсобного производства в течение года предназначена полуавтоматическая универсальная роторная сушилка [5]. На рисунке 1 показана схема полуавтоматической универсальной роторной сушилки, вид спереди.

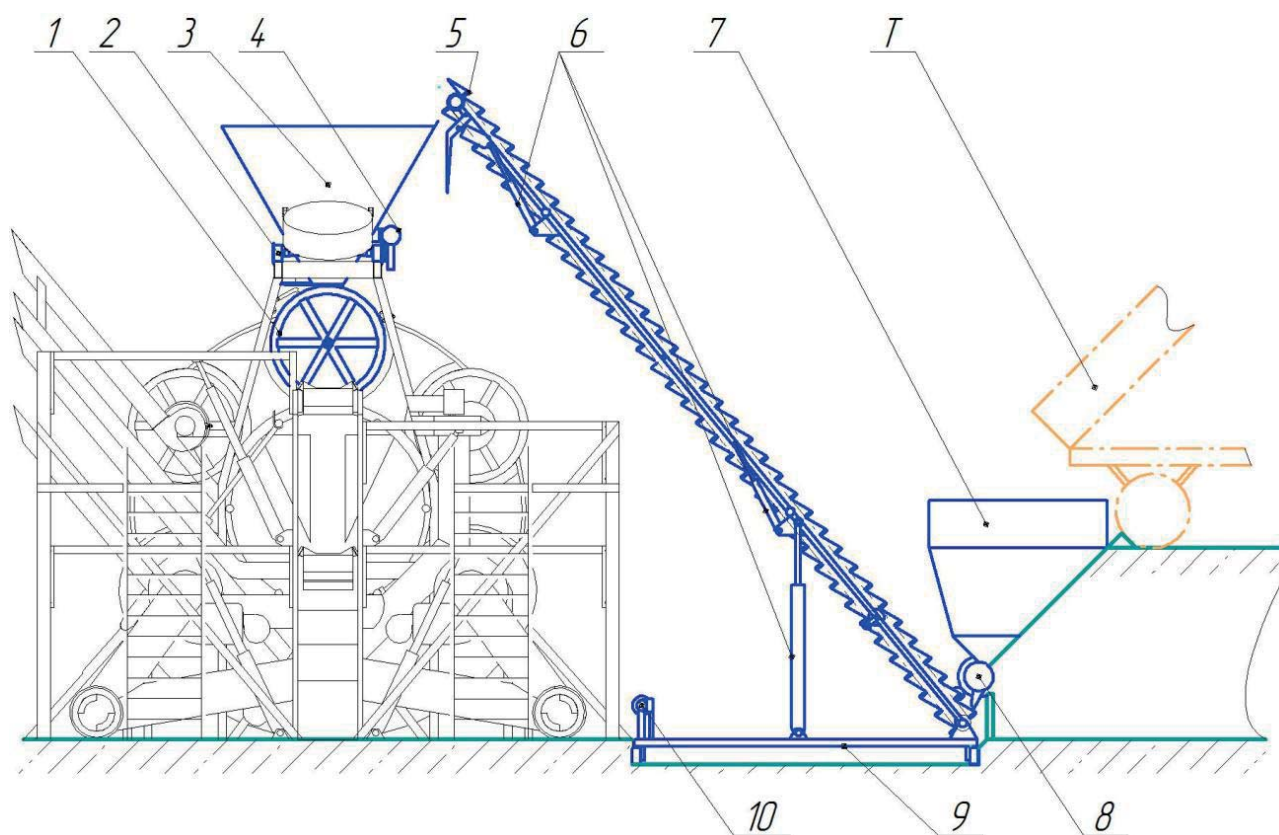
Перед началом работы оператор оценивает вид и состояние подлежащего сушке материала и определяет режим сушки и способ загрузки материала. Если он осуществляет загрузку зерна или других сыпучих материалов, то устанавливает:

- положение платформы 9 посредством привода платформы 10: для загрузки сыпучих материалов сверху;

- положение верхней, средней и нижней части загрузочного конвейера 5 посредством гидроцилиндров управления загрузочным конвейером 6: для загрузки сыпучих материалов сверху (см. рис. 1);

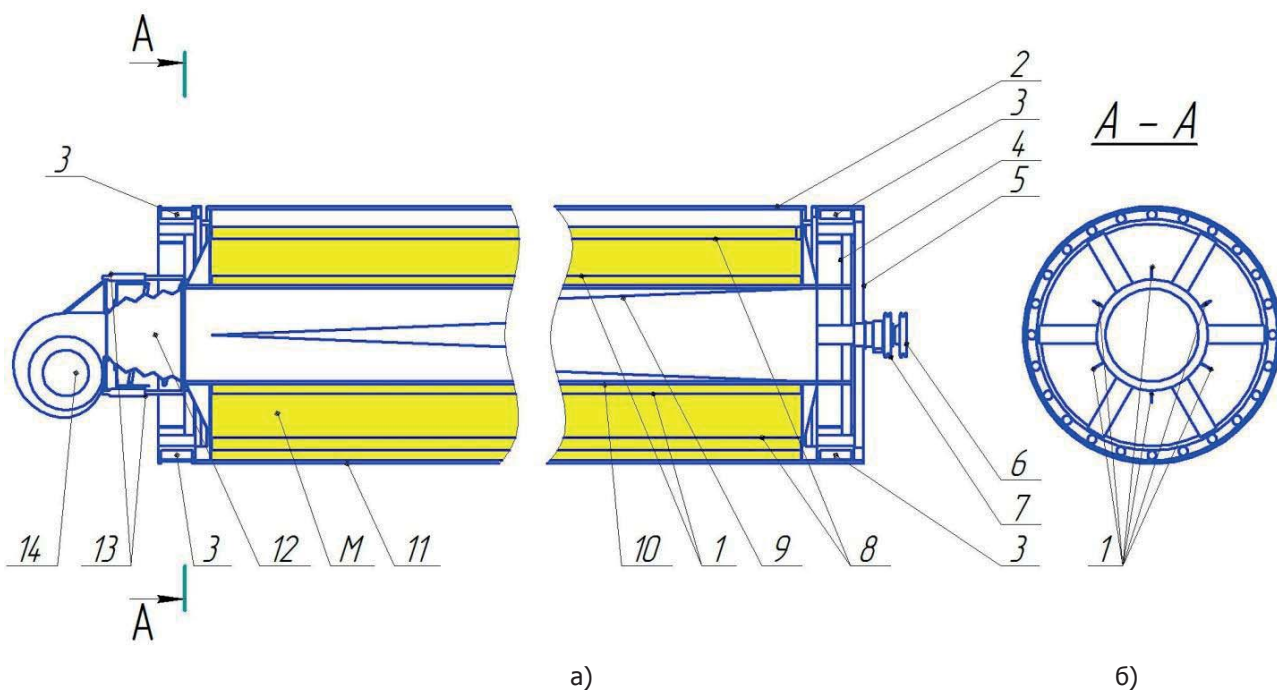
- загрузочный конвейер на поточный режим для загрузки сыпучих материалов;
- положение заслонок для использования продуктов горения в составе агента сушки;
- внешние цилиндры 1 на сушку зерна, других сыпучих материалов (рис. 2);
- режим сушки на пульте управления.

Зерно из транспортного средства *T* (см. рис. 1) высыпает в нижний бункер 7. Ёмкость нижнего бункера 7,5 м<sup>3</sup> – достаточная для выгрузки зерна из автомобиля КАМАЗ и загрузки одного цилиндра. Из нижнего бункера дозатор 8 подаёт зерно в ковши, установленные на загрузочном конвейере. Из ковшей загрузочного конвейера зерно попадает в верхний бункер 3. Верхний бункер установлен на тележке. Она перемещает верхний бункер посредством привода тележки 4 и осуществляет загрузку высушиваемого материала во внешний цилиндр, расположенный сверху, когда открыта крышка внешнего цилиндра 2 (см. рис. 2). Высушиваемый материал *M* располагается между внешним цилиндром и внутренним цилиндром 10. Необходимо определить кинематические, динамические и энергетические параметры элементов универсальной полуавтоматической



1 – внешний цилиндр; 2 – тележка; 3 – верхний бункер; 4 – привод тележки; 5 – загрузочный конвейер; 6 – гидроцилиндр управления загрузочным конвейером; 7 – нижний бункер; 8 – дозатор; 9 – платформа; 10 – привод платформы.

Рисунок 1 – Схема полуавтоматической универсальной роторной сушилки, вид спереди



а – продольный разрез, б – разрез А – А: 1 – планка внутреннего цилиндра; 2 – крышка внешнего цилиндра; 3 – ролик; 4 – луч внутреннего цилиндра; 5 – луч внешнего цилиндра; 6 – звёздочка привода внешнего цилиндра; 7 – звёздочка привода внутреннего цилиндра; 8 – планка внешнего цилиндра; 9 – конус; 10 – внутренний цилиндр; 11 – внешний цилиндр; 12 – проставка; 13 – гидроцилиндр управления проставкой; 14 – вентилятор нагрева; М – высушиваемый материал.

Рисунок 2 – Схема наружного цилиндра, вариант для сушки сыпучих материалов

роторной сушилки при загрузке зерна или других сыпучих материалов.

**Методика.** Угловая скорость вала дозатора должна быть синхронизирована с перемещением ковшей. На рисунке 3 показано поперечное сечение дозатора с указанием размеров элементов. Ширина дозатора  $b_d = 2,2 \text{ м}$ , ширина ковшей загрузочного конвейера  $b_k = 2,5 \text{ м}$  из конструктивной компоновки. Объём зерна, подаваемый одной секцией дозатора,

$$V_c = b_d S_{ci}; V_c = 2,2 \cdot 0,0109 \approx 0,024 \text{ м}^3.$$

В дозаторе шесть секций, поэтому он подаст зерна за один оборот:

$$V_d = 6V_c; V_d = 6 \cdot 0,024 = 0,144 \text{ м}^3.$$

Так как объём между внешним цилиндром и внутренним цилиндром, заполняемый зерном,  $V_3 = 6,74 \text{ м}^3$ , то если бы дозатор заполнял объём между внешним цилиндром и внутренним цилиндром непосредственно, вал дозатора для заполнения этого объёма должен бы совершить

$$n_d = \frac{V_3}{V_d}; n_d = \frac{6,74}{0,144} = 46,8 \text{ оборотов.} \quad (1)$$

Если вал дозатора будет иметь большую угловую скорость, зерно не будет успевать заполнить его секции. Кроме того, при высокой угловой скорости вала, лопасти дозатора будут травмировать

зерновки. Наибольшая высота падения зерновки из нижнего бункера в секцию дозатора:

$$h_d = \frac{350-90}{2} = 130 \text{ мм} = 0,13 \text{ м}.$$

Допустим, начальная скорость зерновки равна нулю. Тогда  $h_d = \frac{g\tau_c^2}{2}$ . Откуда максимальное время падения зерновки из нижнего бункера в секцию дозатора:

$$\tau_c = \sqrt{\frac{2h_d}{g}}; \tau_c = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,13}{9,8}} = 0,163 \text{ с.} \quad (2)$$

Из рисунка 3 толщина верхнего окна дозатора  $c_c = 130 \text{ мм} = 0,13 \text{ м}$ . Поэтому максимальная окружная скорость лопасти дозатора:

$$v_n = \frac{c_c}{\tau_c}; v_n = \frac{0,13}{0,163} \approx 0,797 \text{ м/с.} \quad (3)$$

Радиус лопасти дозатора  $r_n = \frac{348}{2} = 174 \text{ мм} = 0,174 \text{ м}$ . Максимальная угловая скорость вала дозатора из условия заполнения секций зерном:

$$\omega_d = \frac{v_n}{r_n}; \omega_d = \frac{0,797}{0,174} \approx 4,58 \text{ рад/с.} \quad (4)$$

Примем угловую скорость вала дозатора  $\omega_d = 4 \text{ рад/с}$ . Тогда время заполнения зерном

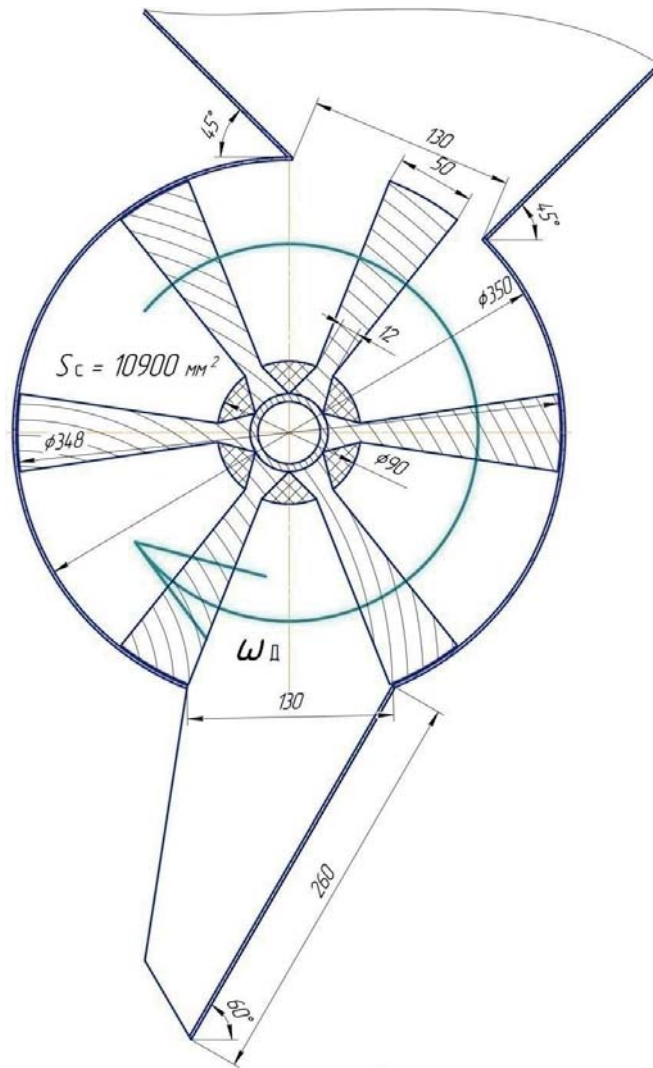


Рисунок 3 – Дозатор

объёма между внешним цилиндром и внутренним цилиндром, если бы дозатор заполнял этот объём непосредственно,

$$\tau_{з\partial} = \frac{2\pi n_{\partial}}{\omega_{\partial}}; \tau_{з\partial} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 46,8}{4} \approx 73,5 \text{ с.} \quad (5)$$

Скорректированная окружная скорость края лопасти дозатора:

$$v_{л} = \omega_{\partial} r_{л}; v_{л} = 4 \cdot 0,174 = 0,696 \text{ м/с.} \quad (6)$$

Скорректированное время заполнения секции:

$$\tau_c = \frac{c_c}{v_{л}}; \tau_c = \frac{0,13}{0,696} \approx 0,187 \text{ с.} \quad (7)$$

Время оборота вала дозатора:

$$\tau_{\partial} = \frac{2\pi}{\omega_{\partial}}; \tau_{\partial} = \frac{2 \cdot 3,14}{4} = 1,57 \text{ с.} \quad (8)$$

Из рисунка 3 видно, что зерно, вытекающее из нижнего бункера, воздействует на лопасти дозатора, придавая валу дозатора вращение. Поэтому будем считать вращающий момент, необходимый для привода дозатора, равным нулю.

Ёмкость ковша должна соответствовать объёму секции дозатора:  $V_k = V_c = 0,024 \text{ м}^3$ . Поскольку ширина ковша загрузочного конвейера  $b_k = 2,5 \text{ м}$ , площадь его поперечного сечения:

$$S_k = \frac{V_k}{b_k};$$

$$S_k = \frac{0,024}{2,5} = 0,0096 \text{ м}^3 = 9600 \text{ мм}^3. \quad (9)$$

Площадь сечения ковша из конструктивной компоновки превышает расчётную площадь (рис. 4).

Как видно из рисунка, расстояние между ковшами  $s_k = 0,26 \text{ м}$ . Скорость загрузочного конвейера:

$$v_k = \frac{6 \cdot s_k}{\tau_{\partial}}; v_k = \frac{6 \cdot 0,26}{1,57} \approx 1 \text{ м/с.} \quad (10)$$

Радиус начальной окружности ведущей звёздочки загрузочного конвейера  $r_{зк} = 0,1 \text{ м}$ . Угловая скорость ведущей звёздочки загрузочного конвейера:

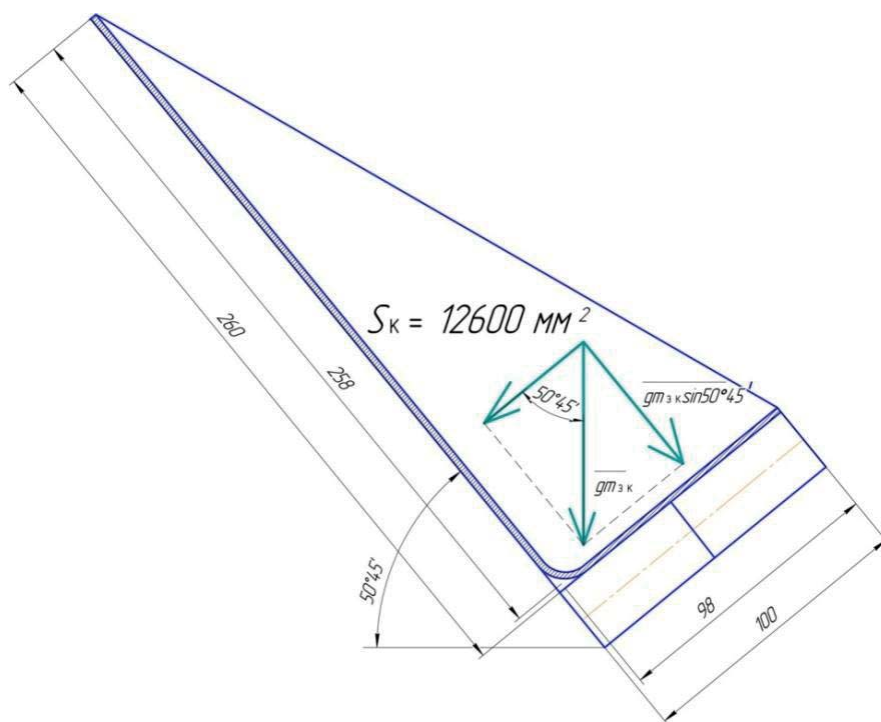


Рисунок 4 – Ковш

$$\omega_{зк} = \frac{v_k}{r_{зк}}; \omega_{зк} = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ рад/с.} \quad (11)$$

Ёмкость ковша  $V_k = 0,024 \text{ м}^3$ . Так как расстояние между ковшами  $s_k = 0,26 \text{ м}$ , при такой скорости загрузочного конвейера он будет подавать четыре ковша в секунду, то есть зерно объёмом  $V_{зк} = 4V_k \approx 0,1 \text{ м}^3$ . Из конструктивной компоновки количество ковшей с зерном на рабочей ветви загрузочного конвейера (см. рис. 1)  $n_{зк} = 35 \text{ шт}$ . Из зерновых культур наибольшую объёмную массу имеет пшеница. Масса пшеницы, расположенной на рабочей ветви загрузочного конвейера,

$$m_{зк} = n_{зк} V_k \rho_{пш}$$

$$m_{зк} = 35 \cdot 0,024 \cdot 850 = 714 \text{ кг.} \quad (12)$$

Вращающий момент привода загрузочного конвейера необходим для преодоления силы тяжести пшеницы, расположенной на рабочей ветви загрузочного конвейера, и сил трения в подвижных элементах загрузочного конвейера. Вращающий момент, необходимый для преодоления силы тяжести пшеницы,

$$M_{зк} = g m_{зк} \sin 50,75^\circ \cdot r_{зк}; \quad (13)$$

$$M_{зк} = 9,8 \cdot 714 \cdot 0,7744 \cdot 0,1 \approx 542 \text{ Нм.}$$

Вращающий момент, необходимый для преодоления сил трения в подвижных элементах загрузочного конвейера, можно определить только экспериментальным путём. Для расчёта цепного загрузочного конвейера примем его равным 20% от момента, необходимого для преодоления силы

тяжести пшеницы, то есть  $108 \text{ Нм}$ . Общий вращающий момент привода загрузочного конвейера  $M_{\Sigma зк} = 542 + 108 = 650 \text{ Нм}$ .

Ёмкость верхнего бункера должна быть кратна объёму между внешним цилиндром и внутренним цилиндром, заполняемому зерном,  $V_b = 6,74 \text{ м}^3$ . Если объём верхнего бункера будет слишком большим, увеличивается нагрузка на каркас. Если объём верхнего бункера будет слишком малым, увеличивается количество ходов тележки для загрузки пространства между внешним цилиндром и внутренним цилиндром, следовательно, время загрузки зерна. Увеличение времени загрузки зерна нежелательно, поскольку цепной привод внешних цилиндров общий на все внешние цилиндры. В период выгрузки или загрузки зерна все внешние цилиндры не вращаются, что может оказать влияние на процесс сушки. Примем расчётный объём верхнего бункера  $V_{б} = \frac{V_b}{5} = 1,348 \approx 1,4 \text{ м}^3$ . Поскольку наибольшая объёмная масса пшеницы, её масса в верхнем бункере является приемлемой:

$$m_{нб} = 1,348 \cdot 850 = 1145 \text{ кг.}$$

Загрузка пространства между внешним цилиндром и внутренним цилиндром будет происходить за пять ходов тележки (см. рис. 1). Время первого заполнения верхнего бункера не будем учитывать, так как его производят до начала загрузки зерна во внешний цилиндр. Суммарное время заполнения верхнего бункера не будет превышать время заполнения зерном объёма между внешним цилиндром и внутренним цилиндром, если бы дозатор

с загрузочным конвейером заполняли этот объём непосредственно, то есть  $\tau_{з\delta} < \tau_{з\delta} = 73,5$  с. С учётом неизбежных пауз при пуске и остановке дозатора с загрузочным конвейером примем чистое суммарное время четырёхкратного заполнения верхнего бункера  $\tau_{з\delta} = 72$  с. Соответственно однократное заполнение верхнего бункера происходит за 18 секунд.

Заполненный верхний бункер перемещается (на рис. 1). В период перемещения верхнего бункера зерно заполняет пространство между внешним цилиндром и внутренним цилиндром. После этого верхний бункер перемещается в исходное положение для следующей загрузки. Из конструктивной компоновки путь верхнего бункера  $s_{з\delta} = 8,2$  м. Скорость перемещения верхнего бункера не должна быть высокой по трём причинам. Во-первых, если скорость будет высокой, возникнут необоснованные затраты энергии на ускорение тележки с верхним бункером, заполненным зерном. Во-вторых, для остановки тележки потребуются дополнительные устройства в связи с большой её инерцией. В-третьих, возможны потери зерна при загрузке его во внешний цилиндр. Поэтому примем скорость тележки с верхним бункером  $v_{з\delta} = 0,5$  м/с. Тогда время одного перемещения верхнего бункера из исходного положения и обратно:

$$\tau_{з\delta} = \frac{2 \cdot s_{з\delta}}{v_{з\delta}}; \tau_{з\delta} = \frac{2 \cdot 8,2}{0,5} = 32,8 \text{ с.} \quad (14)$$

Примем  $\tau_{з\delta} = 33$  с. Первое перемещение верхнего бункера не учитываем, так как его можно совершить до начала загрузки зерна во внешний цилиндр. Тогда общее чистое время загрузки зерна во внешний цилиндр:

$$\tau_{\Sigma з\delta} = \tau_{з\delta} + 4,5\tau_{з\delta}; \quad (15)$$

$$\tau_{\Sigma з\delta} = 72 + 4,5 \cdot 33 = 220,5 \text{ с} \approx 3,7 \text{ мин.}$$

Перемещение тележки с верхним бункером происходит за счёт сцепления зубчатых колёс те-

лежки с рейкой [5]. Из конструктивной компоновки радиус начальной окружности зубчатого колеса  $r_{з\kappa} = 120$  мм = 0,12 м. Его угловая скорость:

$$\omega_{з\kappa} = \frac{v_{з\delta}}{r_{з\kappa}}; \omega_{з\kappa} = \frac{0,5}{0,12} = 4,17 \text{ рад/с.} \quad (16)$$

Масса тележки с верхним бункером  $m_{м+з\delta} \approx 200$  кг. Общая перемещаемая масса тележки, верхнего бункера и пшеницы в верхнем бункере:

$$m_{\Sigma з\delta} = m_{м+з\delta} + m_{п\delta}; \quad (17)$$

$$m_{\Sigma з\delta} = 200 + 1145 = 1345 \text{ кг.}$$

Тележка перемещается по балке каркаса [5]. Нормальная реакция балки каркаса:

$$N_{\delta\kappa} = gm_{\Sigma з\delta};$$

$$N_{\delta\kappa} = 9,8 \cdot 1345 = 13181 \text{ Н.} \quad (18)$$

Примем коэффициент трения качения, с учётом потерь на сцепление зубчатых колёс тележки с рейкой и на сопротивление зерна,  $f = 0,2$ . Сила противодействия перемещению тележки:

$$F_{м\delta\kappa} = fN_{\delta\kappa}; \quad (19)$$

$$F_{м\delta\kappa} = 0,2 \cdot 13181 = 2636 \text{ Н.}$$

Необходимый вращающий момент для перемещения тележки с верхним бункером, наполненным пшеницей,

$$M_{з\delta} = F_{м\delta\kappa} r_{з\kappa}; \quad (20)$$

$$M_{з\delta} = 2636 \cdot 0,12 \approx 316 \text{ Нм.}$$

**Вывод.** В результате анализа взаимодействия высушиваемого сыпучего материала с элементами универсальной полуавтоматической роторной сушилки выявлены кинематические, динамические и энергетические параметры элементов конструкции, осуществляющих загрузку.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Атаназевич В. И. Сушка зерна. М. : Агропромиздат, 1989. 240 с. ISBN 5-10-000534-3.
2. Муштаев В. И., Ульянов В. М. Сушка дисперсных материалов : монография. М. : Химия, 1988. 352 с. ISBN 5-7245-0074-4.
3. Муштаев В. И., Ульянов В. М., Тимонин А. С. Сушка в условиях пневмотранспорта : монография. М. : Химия, 1984. 232 с.
4. Баум А. Е., Резчиков В. А. Сушка зерна : монография. М. : Колос, 1983. 223 с.
5. 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.

#### References

1. Atanazevich V. I. Sushka zerna. M. : Agropromizdat, 1989. 240 s. ISBN 5-10-000534-3.
2. Mushtaev V. I., Ulyanov V. M. Sushka dispersnyh materialov : monografija. M. : Himija, 1988. 352 s. ISBN 5-7245-0074-4.

3. Mushtaev V. I., Ul'yanov V. M., Timonin A. S. Sushka v uslovijah pnevmotransporta : monografija. M. : Himija, 1984. 232 s.

4. Baum A. E., Rezchikov V. A. Sushka zerna : monografija. M. : Kolos, 1983. 223 s.

5. Pat. 2631586 Rossijskaja Federacija, МРК F26B 15/04 (2006.01), F26B 20/00 (2006.01) Poluavtomaticheskaja rotnaja sushilka / V. A. Nikolaev ; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO «Jaroslavskaja gosudarstvennaja sel'skohozjajstvennaja akademija». № 2016123868; zajavl. 15.06.2016; opubl. 25.09.2017, Bjul. № 27. 2 s.

*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.

**В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ ФГБОУ ВО ЯРОСЛАВСКАЯ ГСХА В 2022 ГОДУ  
ВЫШЛА МОНОГРАФИЯ**

**В. В. ШМИГЕЛЬ, Н. Ю. МАХАЕВА, А. С. УГЛОВСКИЙ**

**ССОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ СЕМЯН ОВСА  
НА РЕШЕТАХ С КРУГЛЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ  
В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

В монографии рассматриваются проблемы сепарации семян овса в электростатическом поле на решётах с круглыми отверстиями. Рассматриваются вопросы теории, методики исследований, результаты исследований, экономическое обоснование на уровне 2022 года. Приводится разработанная установка для сепарации овса в электростатическом поле, результаты оптимизации её работы и технико-экономические показатели.

Для студентов старших курсов, бакалавров, магистров, аспирантов, а также инженеров, агрономов и научных работников, занимающихся разработкой электрических сепараторов семян зерновых культур.

**УДК 631.362; ББК 22.33; ISBN 978-5-98914-254-5; 144 СТР.**

**ПО ВОПРОСАМ ПРИОБРЕТЕНИЯ ОБРАЩАТЬСЯ  
ПО АДРЕСУ:**

**150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58, ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА**

**e-mail: e.bogoslovskaya@yarcx.ru**