

УДК 664.8.039

Н. А. Миронова, канд. техн. наук, доц., **А. Н. Поперечный**, д-р техн. наук, проф.
Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-
Барановского, г. Донецк, ДНР, Россия
Тел. / Факс: +7 949 304 26 60; E-mail: mna_21_81@mail.ru

АППАРАТ С УПРУГОДЕФОРМИРУЕМЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

В статье проведено аналитическое исследование по определению скорости транспортирования частицы с помощью быстроходного упругодеформированного пружинного винтового устройства. Получена формула, учитывающая центробежную силу и коэффициенты трения частицы о круглый кожух, а также спираль транспортирующего винта. Предложена конструкция комбинированного сушильно-протирающего аппарата с гибким шнековым транспортирующим органом.

Ключевые слова: транспортирование, рабочий орган, упругий элемент, скорость транспортирования.

N. A. Mironova, A. N. Popereshniy

A DEVICE WITH AN ELASTICALLY DEFORMABLE WORKING BODY

The article presents an analytical study to determine the speed of particle transportation using a high-speed elastic-deformed spring screw device. A formula is obtained that takes into account the centrifugal force and the coefficients of friction of the particle on the round casing, as well as the spiral of the conveying screw. The design of a combined drying and wiping apparatus with a flexible screw conveying body is proposed.

Keywords: transportation, working body, elastic element, speed of transportation.

1. Введение

Известно, что скорость транспортирования материала шнековыми устройствами зависит от целого ряда факторов. В результате движения винтовой поверхности шнека транспортируемый материал движется не параллельно его оси, а винтообразно с переменной скоростью в осевом и радиальном направлениях, в зависимости от расстояния частиц материала до оси шнека, коэффициента трения и величины противодействия [1,2].

Некоторые сведения о методах расчета шнековых рабочих органов не имеют строгой теоретической основы и содержат рекомендации, не учитывающие современного состояния в области их конструирования и эксплуатации. Например, влияние угла наклона оси вала на производительность учтено коэффициентами, отражающими влияние параметров шнеков, режимов их работы, а также физико-механических свойств сырья.

Предлагаемые окончательные выражения по определению средней осевой скорости шнековых транспортирующих устройств, включают в себя ряд коэффициентов, которые в основном учитывают трение между частицами материала, между частицами и винтовой поверхностью шнека, между частицами и поверхностью кожуха (корпуса). Это - коэффициент отставания или коэффициент вращения частиц, коэффициент перемещения, коэффициент сопротивления и др. Физическая природа этих коэффициентов остается не выясненной [3-5].

Движение продукта с помощью гибкого спирального шнека в виде винтовой цилиндрической пружины в настоящее время в полной мере уравнениями не описаны [4-6].

Особенностью такого шнека является быстроходность. При этом периферийная частица прижимается к кожуху и движется по его поверхности по винтовой линии с постоянным (для вертикального шнека) или с переменным (для наклонного и горизонтального шнеков) шагом, постоянно соприкасаясь как с кожухом, так и с гибкой спиралью транспортирующего винта [7].

2. Основное содержание и результаты работы

Производительность гибкого шнекового устройства в числе своих параметров зависит от средней осевой скорости периферийной частицы материала при зазоре между винтом и кожухом равным нулю.

Приближенно можно записать выражение для средней скорости периферийной частицы в виде (в м/с):

$$V_{zcp} = \frac{t}{2\pi} \cdot (\omega_v - \omega_{cp}); \quad (1)$$

или

$$V_{zcp} = \frac{t}{60} \cdot (n_v - n_{cp}), \quad (2)$$

где t - шаг спирали шнека, м;

ω_v и n_v - угловая скорость винта, 1/с;

ω_{cp} и n_{cp} - средняя угловая скорость периферийной частицы за ее оборот, 1/с.

Как видно из уравнений (1) и (2), при заданном шаге и угловой скорости винта определение средней осевой скорости частицы сводится к определению ее средней угловой скорости ω_{cp} .

Движение периферийной частицы по винтовой поверхности можно уподобить движению частицы по наклонной плоскости, имеющей угол подъема α (рисунок 1):

$$\alpha = \arctg \frac{t}{2\pi r} \quad (3)$$

где r - наружный радиус винта, м.

Вектор абсолютной скорости V периферийной частицы (скорости скольжения ее по кожуху шнекового устройства) в каждый момент представляет собой геометрическую сумму вектора переносной скорости V_e

(т. е. окружной скорости периферийного участка винта) и вектора относительной скорости скольжения частицы V_u по периферийной винтовой поверхности, т. е.

$$V = V_e + V_u. \quad (4)$$

Обозначив угол между векторами абсолютной и переносной скоростей частицы через β , из треугольника скоростей (рисунок 2) по теореме синусов имеем:

$$\frac{V}{V_e} = \frac{\sin \alpha}{\sin[180^\circ - (\alpha + \beta)]} \quad (5)$$

или

$$\frac{V}{V_e} = \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (6)$$

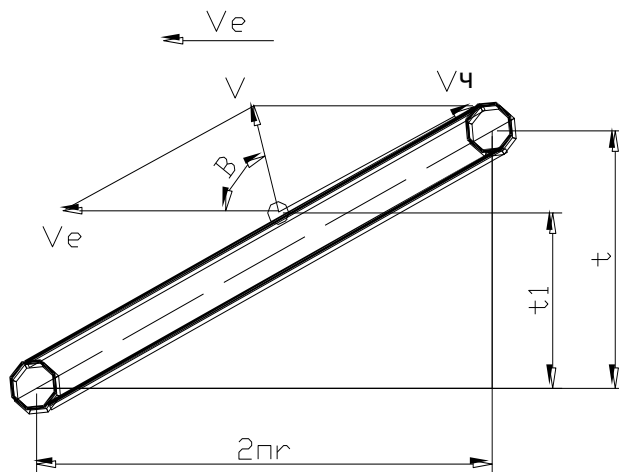


Рисунок 1. К определению параметров шнека

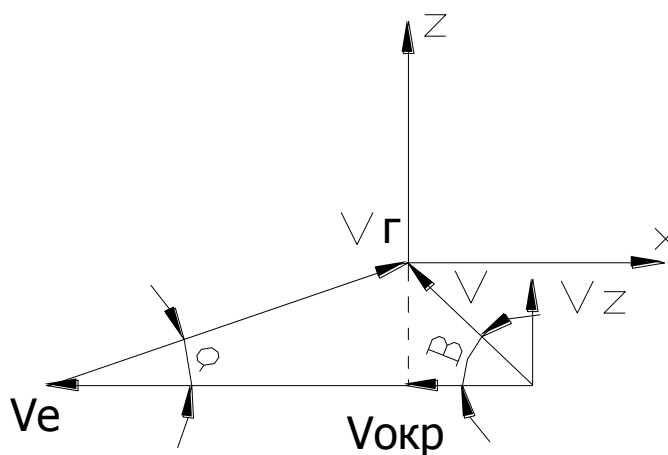


Рисунок 2. Треугольник скоростей.

Из уравнения (6) получаем:

$$V = V_e \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (7)$$

По рис. 1 и выражению (7) окружная скорость частицы $V_{окр}$ (скорость в плоскости, перпендикулярной к оси винта) равна:

$$V_{окр} = V \cdot \cos \beta = V_e \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (8)$$

Подставляя в выражение (8) окружные скорости через их соответствующие угловые скорости, имеем:

$$\omega \cdot r = \omega_g \cdot r \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}.$$

Отсюда, после сокращения на наружный радиус винта r , получаем выражение для угловой скорости периферийной частицы:

$$\omega = \omega_g \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что для данного конкретного винта постоянному углу β соответствует постоянная угловая скорость частицы ω_n , следовательно, изменение угловой скорости частицы зависит от изменения угла β . Для наклонных и горизонтальных винтовых транспортных устройств угол β в различных четвертях поперечного сечения кожуха будет иметь разное значение, поэтому в выражении (9) под ω и β следует понимать их средние значения. При этом постоянная осевая скорость частицы будет V_{zcp} . Для вертикального винта угловая скорость частицы будет постоянной величиной.

По [1] путь, пройденный частицей в осевом направлении за один оборот винта составит (рисунок 1):

$$t_1 = t \cdot (\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha) \cos \alpha, \quad (10)$$

где f - коэффициент трения частицы материала о винтовую поверхность.

Торцевая поверхность вращающейся винтовой цилиндрической пружины сообщает частице материала усилие, одна из проекций которого направлена вдоль оси шнековой спирали и обеспечивает перемещение частицы. В центральной части кожуха транспортера, не подверженной непосредственному воздействию проволочного шнека, материал может двигаться только благодаря внутреннему трению в нем.

3. Общий алгоритм и рекомендации

Рассмотрим силовое воздействие наклонной вращающейся винтовой цилиндрической пружины на периферийную частицу, передающееся посредством трения (в точке А).

На рисунке 3 представлен общий случай расположения периферийной частицы в наклонном транспортере, с рабочим органом в виде винтовой цилиндрической пружины, где: G_1 - сила тяжести частицы; γ - угол между вертикалью и осью пружины; E - угол смещения частицы в рассматриваемый момент, отсчитываемый по направлению часовой стрелки от вертикальной плоскости, проходящей через ось устройства.

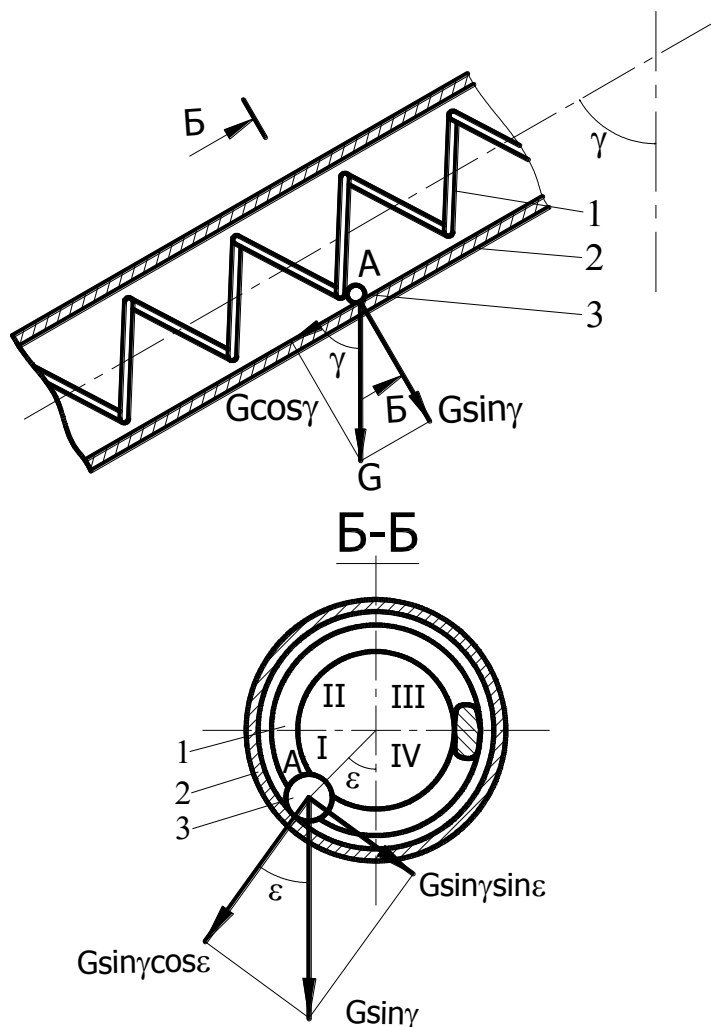


Рисунок 3. Схема к определению нагрузок, действующих на частицу вращающейся спирали: 1 - проволочный шнековый рабочий орган; 2 - кожух (корпус) устройства; 3 - частица материала

Периферийная частица находится под действием следующих сил (рис. 4):
 $G_1 \cdot \cos \gamma$ - составляющая силы тяжести частицы, направленная вдоль оси пружины;
 $G_1 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \varepsilon$ - составляющая силы тяжести частицы, находящаяся в плоскости, перпендикулярной к оси пружины, и направленная по касательной к кожуху;
 F - сила трения частицы о кожух (корпус) устройства, направленная в сторону, противоположную скорости скольжения частицы относительно кожуха (противоположную направлению вектора V);
 R - давление винтовой поверхности, составляющее с нормалью к ней угол трения ϕ_1 ;
 C - равнодействующая вышеперечисленных сил.

На рис. 5 представлен многоугольник сил, соответствующих схеме сил рис. 4.

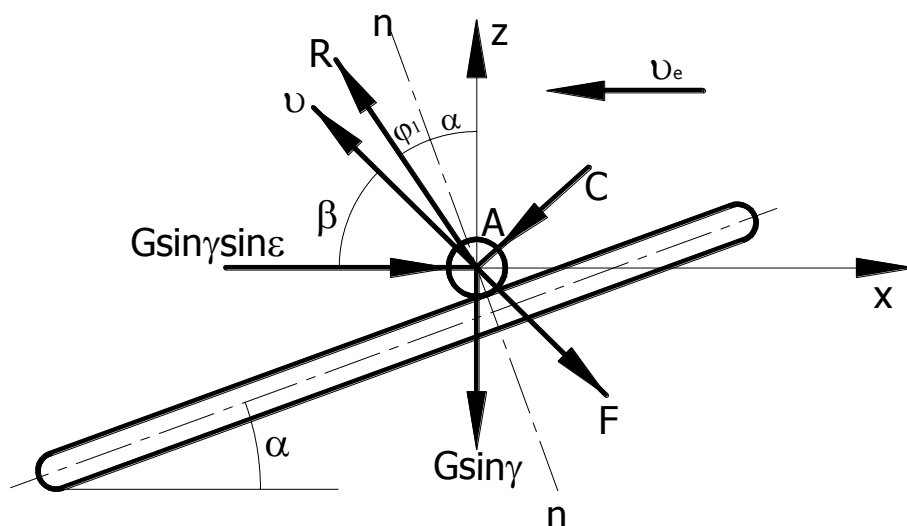


Рисунок 4. Схема действующих на частицу сил

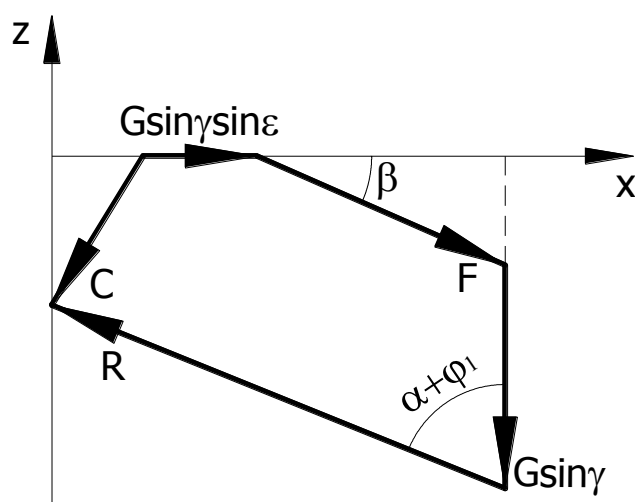


Рисунок 5. Многоугольник действующих на частицу сил

Поскольку скорость частицы есть периодическая величина с периодом, соответствующим одному обороту частицы, и, следовательно, приращение ее кинетической энергии за один оборот равно нулю, то отсюда работа равнодействующей C за один оборот частицы также равна нулю. Частица находится в движении и ее путь не равен нулю; следовательно за один оборот частицы (или за целое число оборотов) равна нулю средняя величина равнодействующей, т.е.

$$C_{cp} = 0.$$

Частицу, движущуюся по кожуху (корпусу) устройства, можно рассматривать как одновременно участвующую в двух движениях: в движении по окружности, в плоскости, перпендикулярной к оси шнековой спирали, и в прямолинейном движении вдоль оси спирали.

За каждый оборот частица перемещается вдоль оси спирали на какую-то величину, произведение которой на составляющую силы тяжести $G_1 \cdot \cos \gamma$ вдоль этой оси представляет собой работу за один оборот частицы.

Работа же составляющей силы тяжести $G_1 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \varepsilon$ при движении частицы по окружности за один ее оборот равна нулю.

Докажем это. Действительно

$$\int_0^{2\pi} G_1 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \varepsilon \cdot r \cdot d \cdot \varepsilon = \int_0^{\pi} G_1 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \varepsilon \cdot r \cdot d \cdot \varepsilon + \int_{\pi}^{2\pi} G_1 \cdot \sin \gamma \cdot \sin \varepsilon \cdot r \cdot d \cdot \varepsilon =$$

$$= G \cdot r \cdot \sin \gamma \left| -\cos \varepsilon \right|_0^{\pi} + G \cdot r \cdot \sin \gamma \left| -\cos \varepsilon \right|_{\pi}^{2\pi} = 2G \cdot r \cdot \sin \gamma - 2G \cdot r \cdot \sin \gamma = 0.$$

По аналогии с предыдущим, поскольку путь частицы по окружности не равен нулю, за один ее оборот (или за целое число оборотов) равна нулю средняя величина составляющей силы тяжести, т. е:

$$(G \cdot \sin \gamma \cdot \sin \varepsilon)_{CP} = 0.$$

Таким образом, вместо многоугольника сил (рисунок 5), можно рассматривать треугольник средних сил (рисунок 6), из которого имеем:

$$F_{CP} \cdot \cos \beta_{CP} = (F_{CP} \cdot \sin \beta_{CP} + G \cos \gamma) \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1). \quad (11)$$

Решая уравнение (11) относительно средней силы трения F_{CP} , находим

$$F_{CP} = \frac{G \cdot \cos \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)}{\cos \beta_{CP} - \sin \beta_{CP} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)}. \quad (12)$$

В общем случае положения частицы на поверхности кожуха (корпуса) под углом ε величину ее силы трения о кожух с учетом центробежной силы можно записать в виде

$$F = f_2 \left(\frac{G \cdot \omega^2 \cdot r}{g} + G \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varepsilon \right), \quad (13)$$

где f_2 - коэффициент трения материала о кожух;
 g - коэффициент свободного падения.

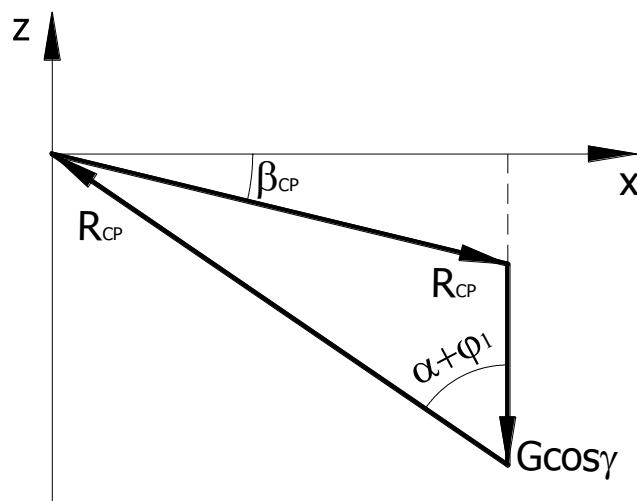


Рисунок 6. Треугольник действующих на частицу сил

При условии быстроходности за счет центробежной силы частица все время прижата к кожуху, т.е. всегда соблюдается неравенство:

$$\frac{G \cdot \omega^2 \cdot r}{g} > G \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varepsilon . \tag{14}$$

Сила $G \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varepsilon$ при вращении частицы изменяет свою величину, уменьшая или увеличивая тем самым силу трения частицы о кожух. При этом можно показать, что при прохождении частицей второй и третьей четвертей поперечного сечения кожуха (рисунок 3) средняя сила трения уменьшается на величину $2f_2 \cdot G \cdot \sin \gamma$, а при прохождении четвертой и первой четвертей – увеличивается на ту же величину $2f_2 \cdot G \cdot \sin \gamma$.

Действительно, при прохождении частицей второй и четвертой четвертей

$$\int_{0,5\pi}^{1,5\pi} f_2 \cdot G \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varepsilon d\varepsilon = f_2 \cdot G \cdot \sin \gamma \cdot \left| \sin \varepsilon \right|_{0,5\pi}^{1,5\pi} = -2f_2 \cdot G \cdot \sin \gamma ,$$

при прохождении же четвертой и первой четвертей

$$\int_{1,5\pi}^{2,5\pi} f_2 \cdot G \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varepsilon d\varepsilon = f_2 \cdot G \cdot \sin \gamma \cdot \left| \sin \varepsilon \right|_{1,5\pi}^{2,5\pi} = -2f_2 \cdot G \cdot \sin \gamma .$$

Следовательно, средняя величина силы трения частицы о кожух за один ее оборот (или за целое число оборотов) равна

$$F = f_2 \frac{G \cdot \omega_{CP}^2 \cdot r}{g} . \tag{15}$$

Подставляя (15) в (12), получим силовое уравнение средней угловой скорости частицы:

$$\omega_{CP} = \sqrt{\frac{g \cdot \cos \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)}{r \cdot f_2 [\cos \beta_{CP} - \sin \beta_{CP} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)]}} . \tag{16}$$

Как видим уравнение (16) включает в себя основные геометрические параметры устройства, коэффициенты трения частицы о кожух (корпус) и о спираль транспортирующего органа.

Если угловая скорость винтовой цилиндрической пружины задана ее частицей вращения n (1/с), то скоростное уравнение средней частоты вращения будет иметь вид:

$$n_{cp} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g \cdot \cos \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)}{r \cdot f_2 [\cos \beta_{cp} - \sin \beta_{cp} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)]}} \quad (17)$$

Определив ω_{cp} по (16) или n_{cp} по (17) по соответствующим выражениям (1) или (2) находится величина средней осевой скорости периферийной частицы в аппарате с упругодеформирующим (пружинным) рабочим органом.

Производительность сушильно-протирочного аппарата с упругодеформирующим (пружинным) рабочим органом может быть определена (в кг/с) как:

$$M = S_p \cdot V_{cp} \cdot \rho \cdot \xi \cdot \kappa, \quad (18)$$

где: ξ - коэффициент заполнения рабочей камеры (подачи); κ - коэффициент, учитывающий снижение транспортирующей способности рабочего органа а процессе протирания (измельчения) материала; ρ - насыпная плотность материала, кг/м³; V_{cp} - линейная скорость перемещения материала, м/с; S_p - площадь поперечного кольцевого рабочего сечения камеры, м².

4. Заключение

Задачей дальнейшей работы являются экспериментальные исследования по определению коэффициентов трения обрабатываемых продуктов (плодов и их косточек) о поверхности кожуха и спирали транспортирующего винта, а также экспериментальные исследования скорости движения продукта в сушильно-протирочном аппарате с целью продвижения аналитических предпосылок.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Харламов, С. В. Конструирование технологических машин пищевых производств / С. В. Харламов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 224с.
2. Остриков, А. Н. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов. – СПб: ГИОРД, 2003. – 352с.
3. Григорьев, А. М. Винтовые конвейеры / А. М. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1972. – 184с.
4. Плаксин, Ю.М. Процессы и аппараты пищевых производств / Ю. М. Плаксин, Н. Н. Малахов, В. А. Лорин. – М.: Колос, 2005. – 760с.
5. Киселев, Б. Р. Ленточный конвейер. Расчет и проектирование основных узлов: учеб. пособие/ Б. Р. Киселев, М. Ю. Колобов – Иваново: Иван. гос. хим. – технол. ун-т, 2019. – 179 с.
6. Ивашов, В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности / В. И. Ивашов. – М.: Гиорд, 2020. – 736 с.
7. Дубинина, Н. А. Организация производства на предприятиях пищевой промышленности / Н. А. Дубинина. – М.: Феникс, 2018. – 544 с.

Поступила в редколлегию 02.02.2023г.