

2. Ogunleye, O., Ajibola, A., Enilolobo, O., Shogunle, O. (2018). Influence of road transport infrastructure on agricultural sector development in Nigeria. *Logistics & Sustainable Transport*. Vol. 9 (1): 39-50.

3. Trofimov A.V., Protsenko A.V. Matema-ticheskaya model rascheta znacheniya normiruemogo raskhoda topliva na osnove dannykh poluchaemykh ot tekhnicheskikh sredstv kontrolya // Vestnik SibADI. – 2012. – No. 5 (27). – S. 43-48.

4. Zhang, H., Zhang, L., Li, Z. (2018). Research on relationship model between fuel consumption of transportation vehicles and speed in region of Hohhot. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* Vol. 188 (1): 012072.

5. Lel, Yu.I. Metodika normirovaniya raskhoda topliva avtosamosvalami v glubokikh karerakh / Yu.I. Lel, I.V. Zyryanov, D.Kh. Ilbuldin, O.V. Musikhina, I.A. Glebov // Izvestiya Uralskogo

gosudarstvennogo gornogo universiteta. – 2017. – No. 4 (48). – S. 66-70.

6. Kurganov V.M., Dorofeev A.N., Gryaznov V.M. Normirovanie raskhoda topliva s ispolzovaniem informatsionnykh tekhnologiy // Vestnik SibADI. – 2018. – T. 15. – No. 2 (60). – S. 237-248.

7. Raschet normativnogo raskhoda topliva. Tyagachi otechestvennye i stran SNG. – Rezhim dostupa: <https://planetcalc.ru/788/?license=1> (data obrashcheniya 5.04.19).

8. Kalkulyator norm raskhoda topliva. – Rezhim dostupa: <http://www.mehanik.ru/calc/CalcOil2.html> (data obrashcheniya 29.03.19).

9. Normy raskhoda topliv i smazochnykh materialov na avtomobilnom transporte (utv. rasporyazheniem Mintransa Rossii ot 14 marta 2008 g. No. AM-23-r v red. rasporyazheniy Mintransa Rossii ot 14.05.2014 N NA-50-r, ot 14.07.2015 N NA-80-r, ot 06.04.2018 N NA-51-r, ot 20.09.2018 N IA-159-r.



УДК 664.73:658.27

С.Ю. Бузоверов
S.Yu. Buzoverov

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ
УВЛАЖНЕННОГО ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА
В КАМЕРЕ СПИРАЛЬНОГО ШНЕКА-УВЛАЖНИТЕЛЯ**

**THE PATTERNS OF MOVEMENT OF DAMPED GRAIN MATERIAL
IN THE CHAMBER OF SPIRAL TEMPERING SCREW**

Ключевые слова: оборудование перерабатывающих производств, увлажнительная машина, спиральный шнек, винтовой конвейер, аппроксимация, линейная зависимость.

Экспериментальные исследования и развитие теории процесса увлажнения зерна актуальны для научного обоснования совершенствования процесса, оборудования и технологического режима переработки зерна, обеспечивающих высокое качество готовой продукции. Одним из путей решения данной проблемы видится в совершенствовании процесса увлажнения зерна перед помолом посредством улучшения производительности шнекового увлажнителя и повышения эффективности его работы. Цель исследований – изу-

чение закономерности движения увлажненного зернового материала в камере спирального шнека в процессе гидротермической обработки. Задачи исследований: определить математическую модель распределения влаги в сыпучем материале по вертикали и горизонтали в шнековом увлажнителе; теоретическое определение производительности шнекового увлажнителя и определение угла внутреннего трения материала. На эффективность смешивания зерна и влаги влияют плотность исходных компонентов, гранулометрический состав (форма, размеры, дисперсионное распределение по степени крупности для неоднородных компонентов) частиц компонентов смеси, влажность компонентов, состояние поверхности частиц, силы трения и адгезии поверхностей частиц и т.д.

Среднее значение угла внутреннего трения φ для зерна пшеницы без указания влажности, при которой этот угол определяется, составило 35° . Найденная производительность согласуется с паспортной для выбранной мельницы ($Q_{\text{пасп.}}=700$ кг/ч). Отклонение составляет 3,6%, что в пределах допустимого. Корреляционно-регрессионный анализ показал, что достаточно хорошо аппроксимируют данные наблюдения следующие линии: линейная зависимость ($R^2=0,748$); экспоненциальная зависимость ($R^2=0,635$); полином второй степени.

Keywords: *processing industry equipment, damping machine, spiral screw, screw conveyor, approximation, linear dependence.*

Experimental research and the development of grain damping process theory are relevant for scientific substantiation of improving the process, equipment and technological regime of grain processing which ensure high quality of finished products. One of the solutions of this problem is the improvement of grain tempering process prior to grinding by increasing the output of tempering screw and its operating efficiency. The research goal was

to study the pattern of the movement of damped grain material in the chamber of the tempering screw during hydrothermal treatment. The research objectives were as following: to determine the mathematical model of moisture vertical and horizontal distribution in the bulk material in the tempering screw; theoretical determination of the output capacity of the tempering screw and determination of the internal friction angle of the material. The following factors influence the effectiveness of mixing grain and moisture: the density of the initial components, mixture particle size distribution (shape, size, and dispersive distribution of the size for heterogeneous components), the moisture content of the components, the state of particle surface, the friction force and adhesion force of particle surfaces, etc. The average value of the internal friction angle φ for wheat grain without specifying the moisture content at the angle determination was 35° . The determined output is consistent with the rated output for the chosen mill ($Q_{\text{rated}} = 700$ kg h). The deviation is 3.6% which is within acceptable limits. Correlation and regression analysis showed that the following lines approximate the observational data quite well: linear dependence ($R^2 = 0.748$); exponential dependence ($R^2 = 0.635$); polynomial of second degree.

Бузоверов Сергей Юрьевич, к.с.-х.н., доцент, доцент каф. «Механизация производства и переработки сельскохозяйственной продукции», Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (385-2) 62-80-56; (385-2) 203-272. E-mail: s-buzoverov@mail.ru.

Buzoverov Sergey Yuryevich, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Chair of Agricultural Production and Processing Mechanization, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-80-56; (385-2) 203-272. E-mail: s-buzoverov@mail.ru.

Решение задач по комплексной переработке сельскохозяйственного сырья, увеличению объемов вырабатываемой продукции и повышению ее качества на крупных перерабатывающих предприятиях возможно только при условии эксплуатации современного высокотехнологичного оборудования. Модернизация оборудования нового поколения предполагает повышение требований к инженерной службе на производстве.

В связи с этим экспериментальные исследования и развитие теории процесса увлажнения зерна актуальны для научного обоснования совершенствования процесса, оборудования и технологического режима переработки зерна, обеспечивающих высокое качество готовой продукции.

Одним из путей решения данной проблемы видится в совершенствовании процесса увлажнения зерна перед помолом посредством улучшения производительности шнекового увлажнителя и повышения эффективности его работы [1, 2].

Цель исследований – изучение закономерности движения увлажненного зернового материала в камере спирального шнека в процессе гидротермической обработки.

Задачи исследований:

- 1) определить математическую модель распределения влаги в сыпучем материале по вертикали и горизонтали в шнековом увлажнителе;
- 2) теоретическое определение производительности шнекового увлажнителя и определение угла внутреннего трения материала.

Результаты исследований

Оборудование для увлажнения предназначено для получения однородной смеси зернового материала и воды путем их смешивания.

Эффективность увлажнения при смешивании оценивают такими показателями, как однородность полученной смеси, а для качественной оценки используют коэффициент неоднородно-

сти. Практически однородной считается смесь, в которой содержание компонентов в любом ее объеме не отличается от заданного содержания для всей смеси.

На эффективность смешивания влияют плотность исходных компонентов, гранулометрический состав (форма, размеры, дисперсионное распределение по степени крупности для неоднородных компонентов) частиц компонентов смеси, влажность компонентов, состояние поверхности частиц, силы трения и адгезии поверхностей частиц и т.д.

Для определения степени однородности полученной смеси выделяют один основной компонент, а остальные объединяют в другой условный компонент. При этом полагают, что если основной компонент смеси распределен равномерно, то и все остальные компоненты распределены также удовлетворительно [3-5].

Коэффициент неоднородности смеси k_c (%) представляет собой отношение содержания основного компонента к его средней массовой доле смеси:

$$k_c = 100 (\sigma_c / c_{cp}) = (100 / c_{cp}) \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(c_i - c_{cp})^2}{(n-1)}}, \quad (1)$$

где σ_c – среднее квадратичное отклонение содержания основного компонента, %;

c_{cp} – средняя массовая доля основного компонента в смеси, %;

c_i – массовая доля основного компонента в i -той пробе, %;

n – число проб.

Чем меньше k_c , тем равномернее смесь, что характеризует эффективность работы смесителей, при $k_c < 10\%$ эффективность смеси считается хорошей.

При большой разнице в плотности и гранулометрическом составе компонентов достижение необходимой степени смешивания затруднено и требует значительного времени.

Процесс смешивания для вращающихся смесителей описывается с помощью двухпараметрической диффузионной модели

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + B_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{B_R}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial c}{\partial R} \right), \quad (2)$$

где v – линейная скорость потока материала;

B_L – коэффициент пропорциональности перемешивания;

B_R – коэффициент поперечного перемещения;

R – радиус поперечного сечения смесителя.

Анализ показывает, что смешивание условно состоит из трех элементарных процессов:

конвективного смешивания – это перемещение групп частиц из одного объема смеси в другой внедрением и скольжением слоев;

диффузионного смешивания – это постепенное перемещение частиц различных компонентов через вновь образованные границы их раздела;

сегрегации – это сосредоточение близких по форме, массе и размерам частиц в различных местах смесителя.

Если разделить по времени смешивание на три интервала, то в первом преобладает конвективное смешивание, во втором – диффузионное, в третьем – сегрегация. Первые два процесса способствуют равномерному распределению частиц в смеси, последний препятствует этому. Поэтому целесообразно заканчивать процесс в конце второго интервала смешивания [6].

Теория распределения жидкости в слое зернистого материала по вертикали. При движении жидкости или газа через слой зернистого материала считают, что поток одновременно обтекает отдельные частицы или элементы слоя и движется внутри пор и пустот, образующих систему извилистых каналов переменного сечения. Изучение такого движения составляет смешанную задачу гидродинамики. Слой зернистого материала при этом может быть неподвижным или подвижным (взвешенным). Движение жидкости или газа в слое зернистых материалов или насадочных тел зависит от многих факторов: направления потока газа или жидкости (восходящий или нисходящий), скорости потока, гидравлического сопротивления слоя (высоты слоя, его однородности,

размера частиц, их формы), удельной поверхности частиц и их скорости витания [3].

Основные характеристики движения в слое. Гидравлическое сопротивление $\Delta p_{\text{сл}}$ неподвижного слоя высотой h_0 и площадью поперечного сечения $f=nD^2/4$ определяется по формуле Дарси – Вейсбаха.

$$\Delta p_{\text{сл}} = \lambda \frac{l}{d_{\text{экв}}} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3)$$

где $l = h_0 \varphi$ – длина каналов в слое, по которым движется поток, м;

φ – коэффициент, учитывающий извилистость каналов в слое;

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр каналов зернистого слоя, м;

ρ – плотность жидкости или газа, образующего поток, кг/м³;

λ – коэффициент гидравлического трения;

v – истинная скорость потока в каналах зернистого слоя, м/с.

Истинная скорость потока в каналах зернистого слоя:

$$v = \frac{v_0}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где v_0 – скорость потока, отнесенная к полному поперечному сечению аппарата (фиктивная скорость), м/с;

ε – порозность слоя (объемная доля газа или жидкости в слое).

Процесс увлажнения зернового материала в предлагаемом увлажнителе. Согласно патенту на изобретение № 2555570 «Устройство для увлажнения зерна» предлагается увлажнитель спирального типа, работа которого аналогична шнековому одновальному смесителю (рис. 1) [4].

В рассматриваемом устройстве процесс увлажнения можно разбить на 2 этапа.

1-й этап – распределение влаги по вертикали. При этом для обеспечения более равномерного распределения влаги по высоте зернового материала патрубок разделен на две части. Причем по одной трубке вода подается на нижнюю часть зернового материала, а по второй – на верхнюю часть материала. Это должно обеспечить более

равномерное распределение влаги по вертикали в приемной части увлажнителя. Математических моделей по распределению влаги по вертикали с дифференцированным вводом влаги в зерновой материал не обнаружено.

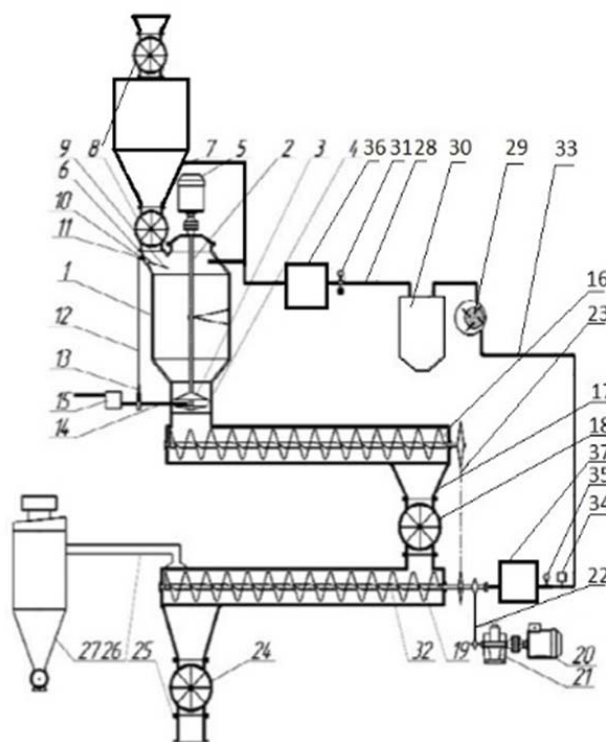


Рис. 1. Предлагаемая увлажнительная машина

2-й этап – окончательное распределение влаги при движении материала вдоль шнека (спирали) [4].

Согласно теории горизонтальных конвейеров производительность их определяется по формуле [5]:

$$Q = 48 \cdot n_{\text{в}} \cdot S_{\text{вт}} \cdot \rho \cdot h^2 \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{в}}}{h} - 1}, \quad (5)$$

где $n_{\text{в}}$ – частота вращения винта, об/мин. (зависит от транспортируемого материала (принимаем максимальную – 140 об/мин.);

ρ – плотность (объемная масса) перемещаемого материала, кг/м³ (для зерна пшеницы $\rho = 780 \text{ кг/м}^3$);

h – расчетная высота слоя движущегося материала, м;

$D_{\text{в}}$ – диаметр винта должен быть в 12 раз больше размера типичных кусков сортированных грузов и в 4 раза больше размера типичных кусков рядовых грузов. Согласно справочным дан-

ным принимается диаметр винта (шнека) 100, 125, 150, 250, 300, 400 и 600 мм; примем $D_{\text{в}} = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$;

$S_{\text{вт}}$ – шаг винта равен диаметру винта горизонтальных увлажнителей и составляет 0,8 диаметра винта.

Как показывает анализ, именно высота слоя h зависит в первую очередь от свойств транспортируемого материала и, в первую очередь, от угла внутреннего трения φ (так называемого угла обрушения сыпучего тела) [6, 7].

Расчетная высота движущегося слоя h определяется исходя из рисунка 2.

Согласно рисунку 2 при $\beta = 0$ угол обрушения сыпучего материала $\alpha_{\text{об}}$ будет равен углу естественного откоса или углу внешнего трения φ , тогда:

$$h = D_{\text{в}} - L_{\text{вт}} \cdot \text{tg } \alpha_{\text{об}} > 0, \quad (6)$$

где $D_{\text{в}}$ – диаметр винта, м;

$L_{\text{вт}}$ – расстояние между концами соседних витков в зоне подвесного подшипника, м.

Исходя из конструкций горизонтальных конвейеров величина $L_{\text{вт}}$ равна шагу винта $S_{\text{вт}}$:

$$L_{\text{вт}} = S_{\text{вт}}. \quad (7)$$

Уравнение (6) перепишем:

$$h = D_{\text{в}} - S_{\text{вт}} \cdot \text{tg } \varphi. \quad (8)$$

При увлажнении величина угла внутреннего трения φ будет меняться от φ_{min} до φ_{max} .

Следовательно, будет увеличиваться значение $\text{tg } \varphi$ и изменится величина h .

В литературе не обнаружено экспериментального подтверждения по зависимости высоты слоя от φ и, соответственно, влажности материала. Из литературных источников можно найти лишь среднее значение угла внутреннего трения φ для конкретной культуры без указания влажности, при которой этот угол определяется.

При $\varphi = 35^\circ$ величина h из уравнения (6) определится как

$$h = D_{\text{в}} - S_{\text{вт}} \cdot \text{tg} 35^\circ. \quad (9)$$

В предлагаемой конструкции диаметр и шаг винта равны и составляют 100 мм, тогда

$$h = 0,1 - 0,1 \cdot 0,7 = 0,03 \text{ м}.$$

Из уравнения (6) выразить h не представляется возможным. Однако зная величину h , найденную из уравнения (9), можно найти предполагаемую производительность увлажнителя

$$Q_{\text{пред}} = 48 \cdot 140 \cdot 0,1 \cdot 780 \cdot 0,03^2 \cdot \sqrt{\frac{0,1}{0,03} - 1} = 722 \text{ кг/ч}.$$

Найденная производительность согласуется с паспортной для выбранной мельницы ($Q_{\text{пасп.}} = 700 \text{ кг/ч}$). Отклонение составляет 3,6%, что в пределах допустимого [7, 8].

В результате проведения исследований по определению влажности зерна пшеницы были получены следующие данные (табл. 1).

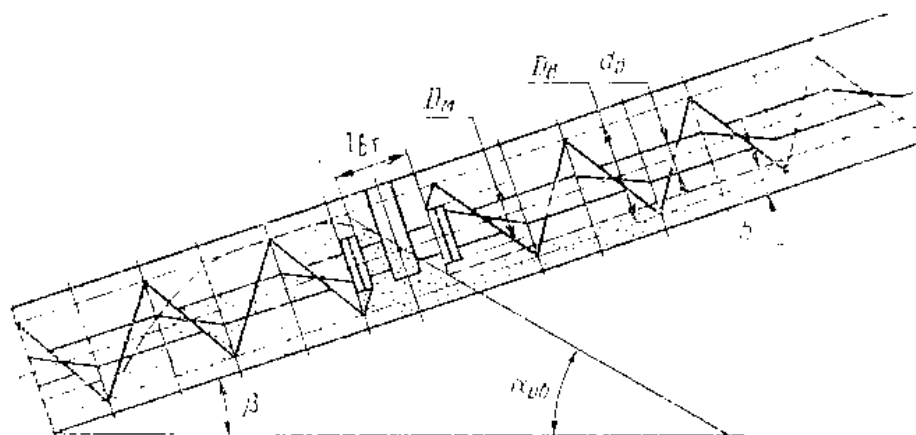


Рис. 2. Схема винтового конвейера

Таблица 1

Влажность зерна пшеницы, %

Номер опыта	До увлажнения	После увлажнения	Время, мин.
1	13,15	16,92	0,5
2	13,29	17,01	0,5
3	13,51	17,01	1
4	13,45	16,64	1
5	13,33	17,16	2
6	12,91	16,9	2
7	13,27	17,9	3
8	13,24	17,71	3
9	13,19	17,72	4
10	12,94	17,39	4
11	13,42	17,62	5
12	13,29	17,52	5
13	13,16	17,8	6
14	13,31	18,0	6
15	12,52	18,32	7
16	12,97	18,18	7

Таблица 2

Приращение влажность зерна пшеницы, %

Номер опыта	Приращение влажности, %	Время, мин.
1	3,77	0,5
2	3,72	0,5
3	3,5	1
4	3,19	1
5	3,83	2
6	3,99	2
7	4,63	3
8	4,47	3
9	4,53	4
10	4,45	4
11	4,2	5
12	4,23	5
13	4,64	6
14	4,69	6
15	5,8	7
16	5,21	7

Установим зависимость между приращением увлажнения и временем обработки зерна (табл. 2).

Корреляционно-регрессионный анализ показывает, что достаточно хорошо аппроксимируют данные наблюдения следующие линии:

- линейная зависимость $y=3,012x-9,398$ ($R^2=0,748$);
- экспоненциальная зависимость $y=0,024e^{1,094x}$ ($R^2=0,635$);
- полином второй степени $y=0,352x^2+6,141x-16,211$ ($R^2=0,755$).

Для прогнозирования можно использовать любую из них, предпочтительнее линейную (рис. 3).

Так, если нами было взято зерно, влажность которого составляет 13,2%, а требуется увлажнить его до 16,6%, то времени на обработку зерна потребуется $y=3,012*(16,6-13,2)-9,398=0,84$ мин.

Коэффициент корреляции составляет 0,865, что говорит о тесной зависимости изменения влажности зерна от времени его обработки в вакууме.

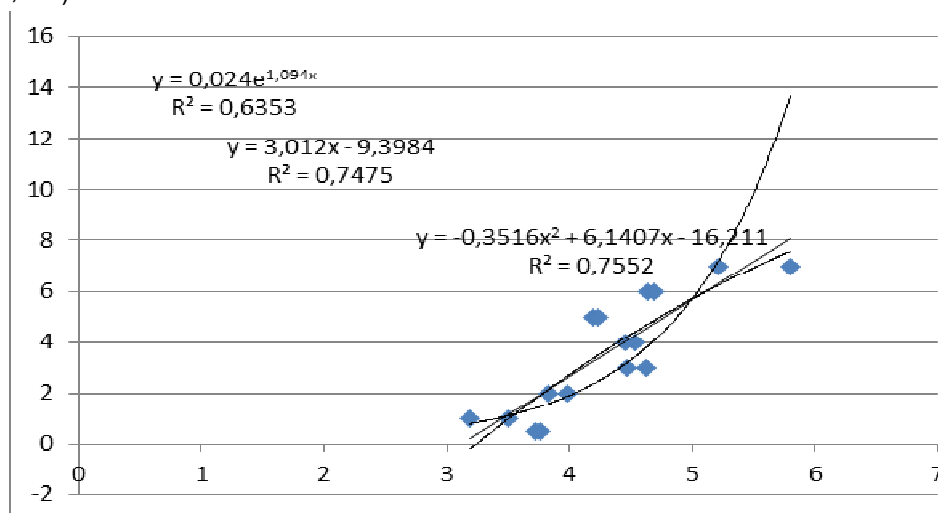


Рис. 3. Линейная зависимость по увлажнению

Дисперсионный анализ позволяет утверждать, что, используя линейную зависимость, вероятность получить неверный прогноз составляет 0,002.

Выводы

1. На эффективность смешивания зерна и влаги влияют плотность исходных компонентов, гранулометрический состав (форма, размеры, дисперсионное распределение по степени крупности для неоднородных компонентов) частиц компонентов смеси, влажность компонентов, состояние поверхности частиц, силы трения и адгезии поверхностей частиц и т.д.

2. Среднее значение угла внутреннего трения φ для зерна пшеницы без указания влажности, при которой этот угол определяется, составило 35° . Найденная производительность согласуется с паспортной для выбранной мельницы ($Q_{\text{пасп.}}=700$ кг/ч). Отклонение составляет 3,6%, что в пределах допустимого.

3. Корреляционно-регрессионный анализ показал, что достаточно хорошо аппроксимируют данные наблюдения следующие линии: линейная зависимость ($R^2=0,748$); экспоненциальная зависимость ($R^2=0,635$); полином второй степени.

Библиографический список

1. Бутковский В.А., Мерко А.И., Мельников Е.М. Технология зерноперерабатывающих производств. – М.: Интерграф сервис, 1999. – 472 с.

2. Алексеев Г.В., Вороненко Б.А., Лукин Н.И. Математические методы в пищевой инженерии: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2012. – 176 с.

3. Егоров Г.А. Гидротермическая обработка зерна. – М.: Колос, 1968. – 96 с.

4. Устройство для увлажнения зерна: пат. № 2555570 Российская Федерация: МПК В02В 1/04 / Лобанов В.И., Бузоверов С.Ю., Дёмин В.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет» – № 2014118160/13; заявл. 05.05.2014; опублик. 10.07.2015, Бюл. № 19.

5. Процессы и аппараты пищевых производств / А.Н. Остриков, О.В. Абрамов, А.В. Логи-

нов и др.; под ред. А.Н. Острикова. – СПб.: ГИОРД, 2012. – 616 с.

6. Федоренко И.Я. Проектирование технических систем и устройств и систем: принципы, методы, процедуры: учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2003. – 282 с.

7. Бузоверов С.Ю. Исследование теории распределения влаги в зерновом материале при его гидротермической обработке на спиральном шнеке // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 11 (145). – С. 164-169.

8. Harkins J. (2004). Quality indicators of flour depending on its humidity. *Food market*. P. 193-200.

References

1. Butkovskiy V.A., Merko A.I., Melnikov Ye.M. Tekhnologiya zernopererabatyvayushchikh proizvodstv. – M.: Intergraf servis, 1999. – 472 s.

2. Alekseev G.V., Voronenko B.A., Lukin N.I. Matematicheskie metody v pishchevoy inzhenerii: uchebnoe posobie. – SPb: Lan, 2012. – 176 s.

3. Yegorov G.A. Gidrotermicheskaya obrabotka zerna. – M.: Kolos, 1968. – 96 s.

4. Ustroystvo dlya uvlazhneniya zerna / Pat. No. 2555570 Rossiyskaya Federatsiya MPK V02B 1/04 / Lobanov V.I., Buzoverov S.Yu., Demin V.A., i dr.; zayavitel i patentoobladatel FGBOU VPO «Altayskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet» – No. 2014118160/13; zayavl. 05.05.2014; opubl. 10.07.2015, Byul. No. 19.

5. Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv / A.N. Ostrikov, O.V. Abramov, A.V. Loginov i dr.; pod red. A.N. Ostrikova. – SPb.: GIORD, 2012. – 616 s.

6. Fedorenko I.Ya. Proektirovanie tekhnicheskikh sistem i ustroystv i sistem: printsipy, metody, protsedury: uchebnoe posobie. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2003. – 282 s.

7. Buzoverov S.Yu. Issledovanie teorii raspredeleniya vlagi v zernovom materiale pri ego gidrotermicheskoy obrabotke na spiralnom shneke // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – No. 11 (145). – S. 164-169.

8. Harkins J. (2004). Quality indicators of flour depending on its humidity. *Food market*. P. 193-200.