

- jablok Sibiri // Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ja. – 2011. – № 4. – S. 21–23.
9. *Tipsina N.N., Prisuha N.V., Koh D.A.* Poroshok iz melkoplodnyh jablok v konditerskom proizvodstve // Vestn. KrasGAU. – 2012. – № 6. – S. 209–213.
 10. *Shevcov A.A.* i dr. Razrabotka tehnologii importozameshchajushhego kormovogo syr'ja na osnove suhih jablochnyh vyzhimok // Kormoproizvodstvo. – 2012. – № 1. – S. 42–44.
 11. *Rachenko M.A.* i dr. Perspektivy promyshlennogo sadovodstva v Juzhnom Predbajkal'e // Vestn. Ros. akad. s.-h. nauk. – 2013. – № 3. – S. 18–21.
 12. *Rachenko M.A.* Jekologo-biologicheskie osobennosti sortov jablon' v uslovijah Juzhnogo Predbajkal'ja: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. – Ulan-Udje: Izd-vo BGU, 2011. – 22 s.
 13. *Ginzburg A.S., Gromov M.A.* Teplofizicheskie karakteristiki kartofelja, ovoshhej i plodov. – M.: Agropromizdat, 1987. – 272 s.
 14. *Filonenko G.K.* i dr. Sushka pishhevyyh rastitel'nyh materialov. – M.: Pishhevaja promyshlennost', 1971. – 439 s.
 15. *Raichkov G., Kimenov G.* Teplofizicheskie karakteristiki na jabl'kov koncentrat // Nauchni trudove Vissh. institut hranit. i vkus. prom. – Plovdiv. – 1983. – T. 30 – № 1. – S. 309–314.
 16. *Lykov A.V.* Teorija sushki. – M.: Jenergija, 1968. – 472 s.



УДК 631.365.32

*Л.О. Онхонова, Г.Ф. Ханхасаев,
И.Ю. Скрябина*

УНИВЕРСАЛЬНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

*L.O. Onkhonova, G.F. Khankhasaev,
I.Y. Skryabina*

UNIVERSAL REMEDY FOR POSTHARVEST PROCESSING OF GRAINY MATERIALS

Онхонова Л.О. – д-р техн. наук, проф. каф. «Технологические машины и оборудование. Агроинженерия» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, г. Улан-Удэ. E-mail: onkhonova47mail.ru

Ханхасаев Г.Ф. – д-р техн. наук, проф. каф. «Биомедицинская техника. Процессы и аппараты пищевых производств» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, г. Улан-Удэ. E-mail: onkhonova47mail.ru

Скрябина И.Ю. – асп. каф. «Технологические машины и оборудование. Агроинженерия» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, г. Улан-Удэ. E-mail: onkhonova47mail.ru

Onkhonova L.O. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Technological Machines and Equipment, Agroengineering, East Siberian State University of Technologies and Management, Ulan-Ude. E-mail: onkhonova47mail.ru

Khankhasaev G.F. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Biomedical Equipment. Processes and Devices of Food Productions, East Siberian State University of Technologies and Management, Ulan-Ude. E-mail: onkhonova47mail.ru

Scryabina I.Yu. – Post-Graduate Student, Chair of Biomedical Equipment. Processes and Devices of Food Productions, East Siberian State University of Technologies and Management, Ulan-Ude. E-mail: onkhonova47mail.ru

Цель исследования – проверка работоспособности аэрожелоба с новыми конструктивными элементами в режиме активного вентилирования и пневмовыгрузки. Задачи исследования: 1) изучить равномерность воздушного распределения во влажной зерновой массе; 2) изучить характер пневмовыгрузки зерновой массы; 3) дать

теоретические зависимости по тепломассообмену во влажной зерновой массе. Материалом для исследования послужили новые конструкции аэрожелоба и зерновые материалы (пшеница, овес, ячмень, имеющие влажность соответственно 12–18,4; 21 и 18 %). Авторами предлагается конструкция трехканального аэрожелоба с новыми

конструктивными элементами в виде блока управления механизмом качения с пружинами и электромагнитами. В результате использования механизма качения с пружинами и электромагнитами обеспечивается более рациональное воздухораспределение внутри зерновой массы, особенно этот эффект ощутим при разгрузке зерна, ранее сопровождавшейся значительным расходом электроэнергии. Большой расход электроэнергии был вызван непроизводительным расходом воздуха при пневматической выгрузке, когда воздух вхолостую устремлялся через перфорированные отверстия, уже освобожденные от зернового слоя. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при работающем аэрожелобе с удельной подачей воздуха $600-1200 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$, максимальной высоте насыпи $h_{\text{сл}} = 250 \text{ мм}$, ширине транспортирующего канала $v_1 = 200 \text{ мм}$, относительной влажности воздуха 75 % средняя производительность увеличивается на 15 %, следовательно, сокращение электроэнергии составит примерно такое же количество. Съем влажности составил 3,8 %, что на 1,5 % больше, чем на существующих аэрожелобах. Также в статье приводятся теоретические зависимости по тепло- и массообмену в зерновой массе, которые не противоречат основным двум законам тепло-массообмена и основаны на законе сохранения энергии и законе сохранения массы вещества.

Ключевые слова: аэрожелоб, тепло- и массообмен, сушка, активное вентилирование, зерновая масса.

The research objective was to check the operability of airslide with new constructive elements in the mode of active aeration and pneumounloading. The research problems were to study the uniformity of air distribution in damp grain weight; to study the nature of pneumounloading of grain weight; to give theoretical dependences on heatmass exchange in damp grain weight. As material for the research new designs of airslide and grain materials (wheat, oats, barley having humidity respectively 12–18.4 served; 21 and 18 %). The design of three-channel airslide with new constructive elements in the form of the control unit of the swing mechanism with springs and electromagnets were offered. As a result of using the mechanism of swing with springs and electromagnets more rational airdistribution in grain weight was provided, especially this effect was notable at the un-

loading of grain which was earlier followed by considerable expense of electric power. Great expense of electric power was caused by unproductive consumption of air at pneumatic unloading when air empty directed through punched openings already exempted from grain layer. Conducted pilot studies showed that with airslide working with specific air supply of $600-1200 \text{ м}^3 / (\text{т}\cdot\text{ч})$, the maximum height of the embankment of $h_{\text{sl}} = 250 \text{ мм}$, width of the transporting channel $v_1 = 200 \text{ мм}$, relative humidity of air of 75 % of average productivity increases by 15 %, therefore, the reduction of electric power would make approximately the same quantity. Humidity reduction made 3.8 % that was 1.5 % more, than on existing airslides. Also in the study theoretical dependences on warmth and mass exchange were given in the grain weight which did not contradict two basic laws of heat mass exchange and were based on the law of energy conservation and the law of conservation of mass substance.

Keywords: airslide, warmth and mass exchange, drying, active aeration, grain mass.

Введение. Зерноперерабатывающая промышленность является одной из ключевых отраслей сельского хозяйства и основой продовольственной безопасности страны. Поэтому необходимость поддержки сельского хозяйства, в частности зерноперерабатывающей промышленности, сегодня является приоритетной задачей государства.

Зерно как сырье является базовым компонентом для многих отраслей агропромышленного комплекса, и потери, связанные с послеуборочной обработкой, хранением и переработкой продукта, остаются актуальными. При надлежащих условиях послеуборочной обработки зерно является продуктом с исключительно долгим сроком хранения, гарантией высокой сохранности биологических и технологических свойств. С необходимостью иметь запасы стратегического сырья возникает необходимость обеспечения условий для сохранности не только прошедшего обработку, но и свежесобранного зерна.

Операции сушки и активного вентилирования сопровождаются тепло- и влагообменом в процессе обработки.

Если работы А.В. Лыкова, П.Д. Лебедева, А.С. Гинзбурга и многих других о тепловлагообменных процессах были посвящены процессам, происходящим в стационарных толстых и тонких слоях в различных емкостях, то литературный обзор показал, что отсутствуют исследования,

посвященные этим вопросам в зерновых слоях в емкостях с перфорированными днищами.

Цель исследования: проверка работоспособности аэрожелоба с новыми конструктивными элементами в режиме активного вентилирования и пневмовыгрузки.

Для достижения цели исследования поставлены следующие задачи:

- 1) исследовать равномерность воздухораспределения во влажной зерновой массе;
- 2) исследовать характер пневмовыгрузки зерновой массы;
- 3) дать теоретические зависимости по тепло-массообмену во влажной зерновой массе.

Материалы и методы исследования. Материалом для исследования послужили новые конструкции аэрожелоба и зерновые материалы (пшеница, овес, ячмень, имеющие влажность соответственно 12–18,4; 21 и 18 %).

Последние конструкции аэрожелобов представляют собой устройства с тремя воздухораспределительными коробами, снабженными перфорированными перегородками, которые представлены не только как элементы, разделяющие на две части (отсеки): верхняя – несущая материальная, нижняя – воздухоподводящая. Конструкция аэрожелоба, на которой проводились исследования (рис. 1), представлена в заявке в госкомитет по изобретениям.

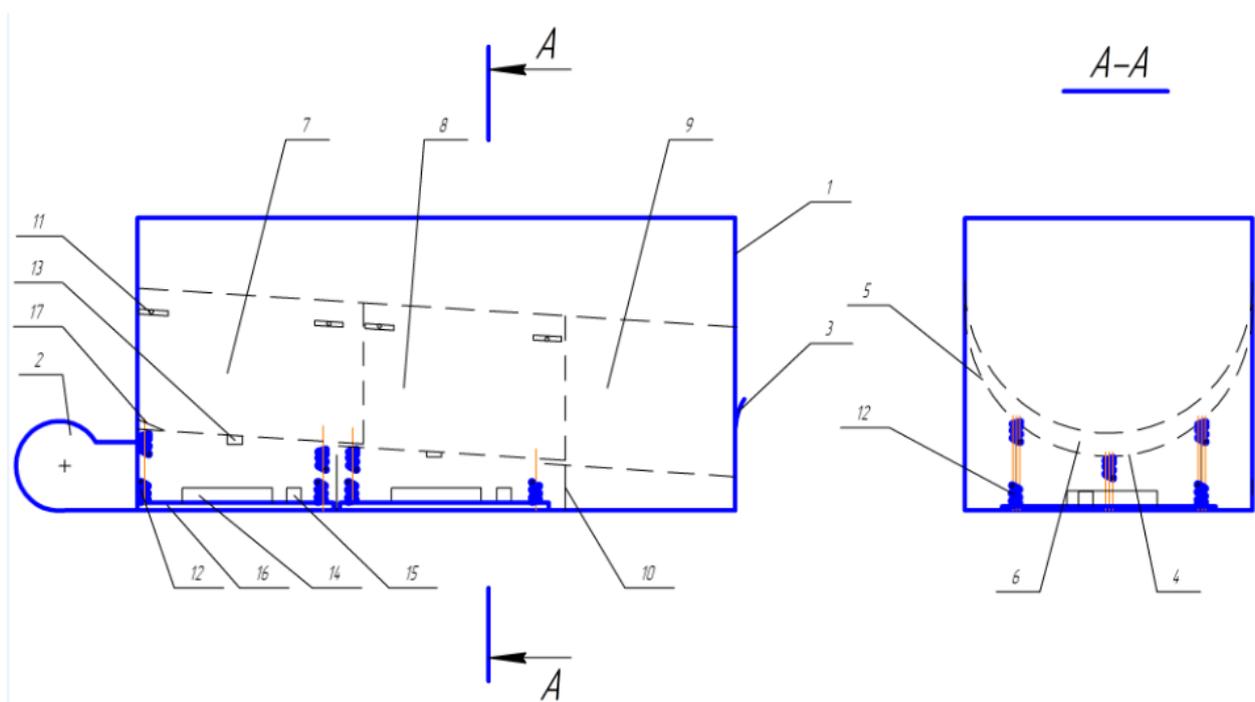


Рис. 1. Аэрожелоб для активного вентилирования и транспортирования сыпучего материала: 1 – бункер; 2 – вентилятор; 3 – выгрузной люк; 4 – транспортирующий основной воздухораспределительный канал; 5 – боковой воздухораспределительный канал; 6 – перфорированная решетка; 7–9 – секции; 10 – рама; 11 – устройство крепления; 12 – пружина; 13 – магнит; 14 – электромагниты и прерыватель; 15 – блок управления и пульт управления (на чертеже не показан); 16 – основание; 17 – козырек

Аэрожелоб для активного вентилирования и транспортирования сыпучего материала содержит бункер 1, вентилятор 2, выгрузной люк 3, транспортирующий основной 4 и боковые 5 воздухораспределительные каналы, снабженные перфорированной решеткой 6. Перфорированная решетка 6 основного и боковых воздухораспределительных каналов состоит из нескольких отдельных секций 7, 8 и 9, установленных внахлест друг за другом. Последняя секция 9 закреплена жестко на раме 10. Секции 7 и 8 закреплены с

возможностью перемещения вдоль оси аэрожелоба посредством устройства крепления 11, расположенных на стенках бункера 1. Под секциями 7 и 8 перфорированной решетки 6 установлены устройство для качения и несколько пружин 12 для обеспечения упругости опорной конструкции каналов 4 и 5. Устройство качения включает в себя магнит 13, закрепленный под перфорированной решеткой 6, электромагниты и прерыватель 14, блок управления 15 и пульт управления (на чертеже не показан). Пружины 12 и устройство

для качения закреплены на основании 16. Перфорированные решета 6 каналов 4 и 5 в поперечном сечении имеют форму полукруга. В начале аэрожелоба над секцией 7 расположен козырек 17, прикрепленный жестко к стенке бункера 1.

Аэрожелоб для активного вентилирования и транспортирования сыпучего материала работает следующим образом.

Исходный сыпучий материал загружают в бункер 1. Через вентилятор 2 воздушный поток поступает в основной воздухораспределительный канал 4 и воздухораспределительные боковые каналы 5. Воздух, проходя через перфорированные решетки 6 секций 7 и 8 активно вентилирует и приводит к транспортированию материала за счет псевдооживления сыпучего материала. Благодаря углу естественного откоса материал плавно «скатывается» по перфорированной решетке 6. Далее с помощью блока управления 15 включают устройство для качения. Электромагниты и прерыватель 14 работают асинхронно, чем создают продольные колебания вдоль оси аэрожелоба. Пружины 12 создают упругую опорную конструкцию, которая поддерживает колебания как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Секции 7 и 8, расположенные внахлест друг за другом, могут быть взаимозаменяемы и работать автономно (модульно). Так сыпучий материал перемещается более равномерно по всей длине аэрожелоба, что обеспечивает равномерную подачу материала к выгрузному люку 3. При этом процесс тепло- и массообмена происходит более интенсивно за счет «скатывания» и стохастического движения зерна.

Исследования показали, что в аэрожелобе зерно располагается в толстом аэрируемом слое на решетчатой перегородке. При нагнетании воздуха через перфорации происходит очень сложная картина взаимосвязи движущегося аэрируемого слоя с воздушным потоком в направлении выгрузного отверстия.

Возможность аналитически описать процесс сушки и активного вентилирования зерна имеет свои трудности, так как зерно неоднородно по своей структуре и обладает различной теплопроводимостью в различных местах. Процесс теплообмена усложняется вследствие сложной геометрической формы зерновки и аэродисперсной среды в движущемся слое.

Сегодня исследования между отечественными и зарубежными исследователями тепло-массообменных процессов, проходящих в зерновой массе, вза-

имно дополняют друг друга и дают более полную картину данного вопроса, различия заключаются в методике и техническом обеспечении.

Существуют исследования с описанием дифференциальных уравнений теплообмена, происходящих в различных условиях, с учетом начальных и граничных условий, существуют математические модели при сушке зерна в элементарном слое, сушке зерна с непрерывно движущимся потоком зерна, при которых зерновая масса принята в виде неограниченной пластины либо в виде неограниченно длинного цилиндра.

Большинство зарубежных исследователей теплообмена в зерновой насыпи в процессе имитации и моделирования хранения зерна в силосах используют уравнение импульса Навье – Стокса с применением методов конечных элементов [2]. Большинство работ отечественных исследователей по описанию математической модели сушки зерна основаны на модели, предложенной В.И. Жидко и А.С. Бомко [2].

Однако все модели приведены для случаев нахождения зерна в емкостях с плоским дном, к сожалению, для нашего случая, т. е. активного вентилирования и сушки зерновой массы в аэрожелобах с перфорированными перегородками, они не могут использоваться.

Если в емкостях без перфораций в днищах воздух подается сплошным неразрываемым потоком как обычно – сбоку, то в аэрожелобах воздух подается снизу в виде многочисленных фонтанирующих единичных воздушных «столбиков», прорываемых через перфорации. Вследствие такой возможности проникновения воздушных «столбиков» в зерновую массу теплообмен имеет другую картину.

В аэрожелобе теплообмен происходит одновременно двумя способами переноса энергии – теплопроводностью и конвекцией, при которых тепло переносится вследствие беспорядочного движения как молекул воздуха, так и зерен между собой.

В процессах активного вентилирования и сопровождающейся их сушки должно соблюдаться условие равенства потенциалов до и после операции, т. е. должен соблюдаться тепловой баланс:

$$Q = Q_1 = Q_2, \quad (1)$$

где Q_1 и Q_2 – тепловая нагрузка в аэрожелобе до и после операции соответственно.

Пусть массовый расход более нагретого теплоносителя, в данном случае зерновой массы, составляет G_1 , его энтальпия на входе в аппарат $I_{1н}$ и на выходе из аппарата $I_{1к}$. Расход более холодного теплоносителя (холодного воздуха) – G_2 , его начальная энтальпия $I_{2н}$ и конечная энтальпия $I_{2к}$. Тогда уравнение теплового баланса будет выглядеть так:

$$Q = G_1(I_{1н} - I_{1к}) = G_2(I_{2к} - I_{2н}). \quad (2)$$

В объеме зерновой массы теплообмен протекает без изменения агрегатного состояния зерновой массы и холодного воздуха, тогда их энтальпии равны произведению теплоемкости c на температуру t :

$$\begin{aligned} I_{1н} &= c_{1н}t_{1н}, & I_{1к} &= c_{1к}t_{1к}, \\ I_{2к} &= c_{2к}t_{2к}, & I_{2н} &= c_{2н}t_{2н}. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение теплового баланса с учетом формулы (2) принимает следующий вид:

$$Q = G_1c_1(t_{1н} - t_{1к}) = G_2c_2(t_{2к} - t_{2н}), \quad (4)$$

или

$$Q = W_1(t_{1н} - t_{1к}) = W_2(t_{2к} - t_{2н}),$$

где W_1 и W_2 – водяные эквиваленты нагретого и холодного теплоносителя соответственно.

В зерновой массе также происходит массообмен.

Перенос вещества можно описать уравнением

$$dQ + dW = dE + PdV - \sum_k \mu dv_k, \quad (5)$$

где dE – энергия работы по переносу тепла и влаги.

Остальные параметры указывают на параметры по состоянию зерна, включая геометрические и теплофизические величины.

Эти два уравнения описывают основные два закона тепло- и массопереноса и основаны на законе сохранения энергии и законе сохранения массы вещества.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при работающем аэрожелобе с удельной подачей воздуха $600-1200 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{ч})$, максимальной высоте насыпи $h_{сл} = 250 \text{ мм}$, ширине транспортирующего канала $b_1 = 200 \text{ мм}$, относительной влажности воздуха 75% средняя производительность увеличивается на 15% , следовательно, сокращение электроэнергии составит примерно такое же количество (рис. 2). Съем влажности составил $3,8 \%$, что на $1,5 \%$ больше, чем на существующих аэрожелобах (рис. 3).

Анализ графика позволяет сделать вывод, что при статическом давлении $P_{ст} = 800-1000 \text{ Па}$ средняя производительность выгрузки трех зерновых культур примерно одинакова и составляет $G = 2,4-2,5 \text{ кг/с}$.

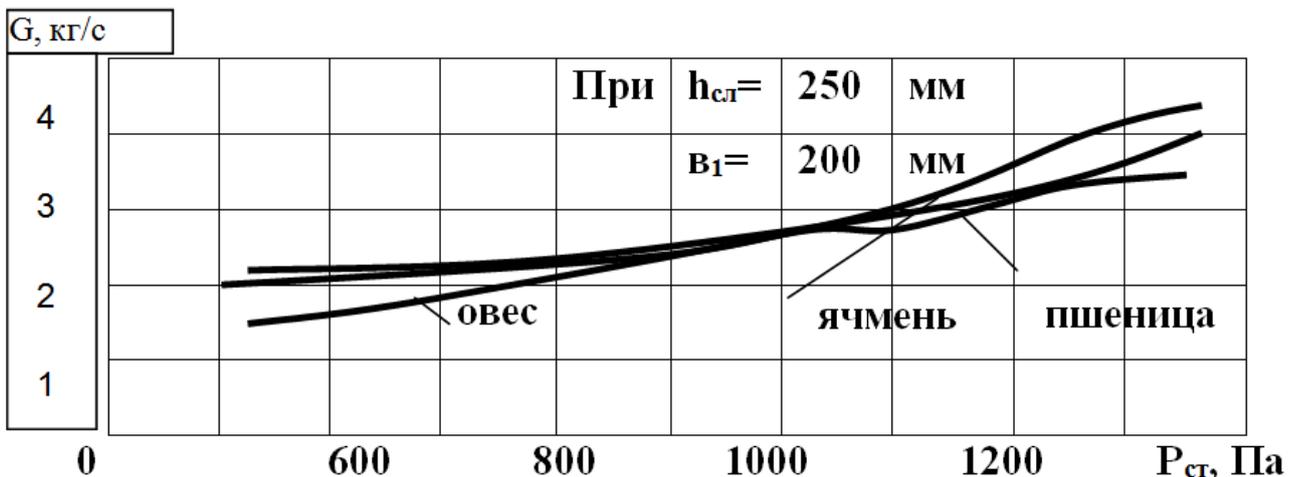


Рис. 2. Зависимость средней производительности разгрузки от статического давления воздуха в транспортирующем канале

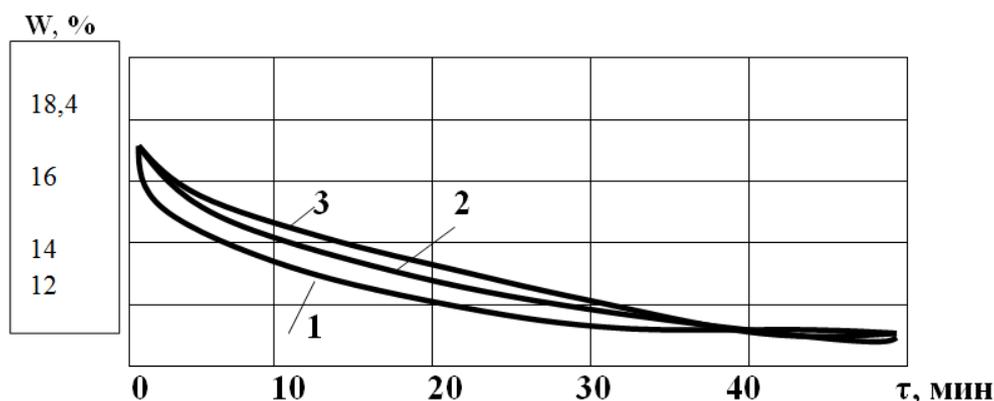


Рис. 3. Зависимость изменения влажности зерна на универсальном аэрожелобе: 1 – $h_{сл}=45$ мм; 2 – $h_{сл}=50$ мм; 3 – $h_{сл}=60$ мм; зерновой материал – пшеница с влажностью $W=18,4$ %.

Выводы

1. Установлена работоспособность аэрожелоба с новым конструктивным элементом в виде блока управления механизмом качения с пружинами и электромагнитами.

2. При предлагаемой конструкции аэрожелоба с новыми конструктивными элементами тепло- и массообмен в массе материала происходит более интенсивно вследствие вынужденного перемешивания и наблюдаемого послойного «скатывания» и стохастического движения зерна.

3. Приведены зависимости, описывающие механизм тепло- и массопереноса во влажной зерновой массе.

4. Производительность увеличивается на 15 %, съём влажности составил 3,8 % по сравнению с существующими аэрожелобами.

Литература

1. Гержой А.П., Самочетов В.Ф. Зерносушение и зерносушилки: учеб. пособие. – 4-е изд., дораб. и доп. – М.: Колос, 1967. – 255 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
3. Онхонова Л.О. Научные основы создания и применения универсальных аэрожелобов в процессах послеуборочной обработки семян и зерна. – М.: Изд-во ВИМ, 2000. – 250 с.

4. Keller S.O.R., José H.M., Marcio A.M., Jairo A.O.S. & Adílio F.L.F. (2013) Three-Dimensional Modeling and Simulation of Heat and Mass Transfer Processes in Porous Media: An Application for Maize Stored in a Flat Bin, Drying Technology, Published online: 27 Jun 2013. – URL: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2013.775145>

Literatura

1. Gerzhoy A.P., Samochetov V.F. Zernosushenie i zernosushilki: ucheb. posobie. – 4-e izd., dorab. i dop. – M.: Kolos, 1967. – 255 s.
2. Lykov A.V. Teorija teploprovodnosti. – M.: Vyssh. shk., 1967. – 599 s.
3. Onhonova L.O. Nauchnye osnovy sozdaniya i primeneniya universal'nyh ajerozhelobov v processah posleuborochnoj obrabotki semjan i zerna. – M.: Izd-vo VIM, 2000. – 250 s.
4. Keller S.O.R., José H.M., Marcio A.M., Jairo A.O.S. & Adílio F.L.F. (2013) Three-Dimensional Modeling and Simulation of Heat and Mass Transfer Processes in Porous Media: An Application for Maize Stored in a Flat Bin, Drying Technology, Published online: 27 Jun 2013. – URL: <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2013.775145>