

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЗЕРНОСУШИЛОК КОНТАКТНОГО ТИПА

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и энергетика»

Павлушин Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и энергетика»

Карпенко Галина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и энергетика»

ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина»

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, дом 1; тел.: 89050359200;

e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.

Ключевые слова: тепловой режим зерносушилки, сушка зерна, экспозиция сушки, контактный теплоподвод.

Обоснована перспективность использования контактного способа теплоподвода при сушке зерна. Предложены конструкции энергосберегающих средств механизаций сушки зерна, реализующие контактный нагрев продукта. Приведены основные зависимости, отражающие механизм контактной сушки зерна. Разработана методика проведения исследований. Определены оптимальные режимы работы предложенных зерносушилок.

Введение

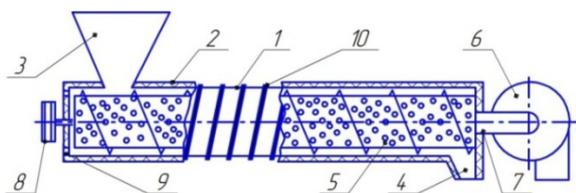
Перспективность применения контактного способа подвода теплоты к зерну при его тепловой обработке подтверждена многочисленными исследованиями [1]. Источником теплоты для обогрева контактной поверхности тепловой камеры служат пар, горячая вода, электроэнергия и др. Под контактной поверхностью здесь принята нагретая поверхность сушильной (тепловой) камеры, с которой слой зерна находится в непосредственном контакте. При этом скорость теплопередачи зависит от температуры нагрева контактной поверхности, толщины обрабатываемого зернового слоя, а также времени контакта зерна с греющей поверхностью (экспозиции теплового воздействия). Следует отметить, что контактный нагрев в чистом виде для высокопроизводительных установок не достаточно эффективен по сравнению с наиболее распространённым конвективным способом подвода теплоты. Однако при переработке небольших партий зерна (в условиях фермерских хозяйств) контактный способ теплопередачи можно использовать гораздо шире и на более высоком энергетическом уровне [2].

На основе анализа существующих средств механизации сушки зерна нами предложены и запатентованы конструкции зерносушилок контактного типа (ЗКТ) (рис. 1).

Основой конструкций ЗКТ-1, ЗКТ-2 и ЗКТ-3 являются цилиндрическая греющая контактная поверхность с электронагревателем, шнековый транспортирующий рабочий орган и устройство для удаления влаги [3].

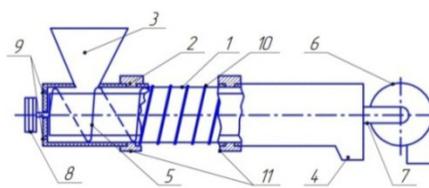
Принципиальным отличием ЗКТ-2 от ЗКТ-1 является составной цилиндрический кожух. Кроме того, составные части кожуха ЗКТ-2 разделены между собой теплоизолирующими кольцами и снабжены индивидуальными нагревательными элементами. Транспортирующий рабочий орган ЗКТ-2 выполнен в виде шнека с перфорированными витками, причём диаметр перфорации витков шнека не превышает минимального размера зерна. Такое конструктивное исполнение позволяет осуществить более быстрый прогрев зерна и поддерживать его температуру в пределах, которые не снижают посевные или технологические свойства зерна [4, 5].

Отличие ЗКТ-3 от предыдущих схем за-



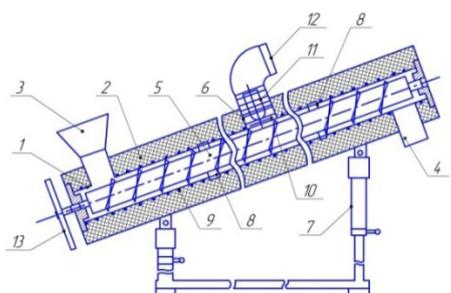
патенты РФ №№ 59226, 96639, 2506507

а)



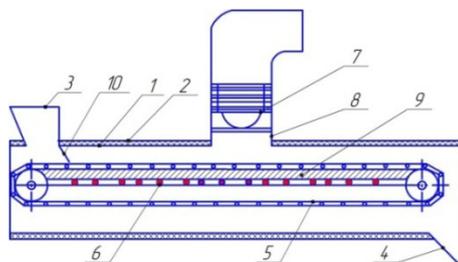
патенты РФ №№ 2323580, 2506506, 2508513

б)



патенты РФ №№ 118036, 119862, 119863, 119864, 120201, 2371650, 2428642, 2506509

в)



патенты РФ №№ 90970, 92603, 96466, 96467, 96468, 99130, 99131, 110291, 138775, 138871, 138950, 139016, 139017, 2411432, 2413912, 2436630, 2446886, 2453123, 2460405, 2465527, 2528234, 2532464, 2532464, 2532467, 2532468

г)

Рис. 1 – Конструктивно-технологические схемы ЗКТ:

а) ЗКТ-1: 1 – кожух; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – транспортирующий рабочий орган (перфорированный шнек); 6 – вентилятор; 7 – воздуховод; 8 – привод шнека; 9 – отверстия; 10 – электрический нагревательный элемент; б) ЗКТ-2: 1 – кожух; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – шнек с перфорированными витками; 6 – вентилятор; 7 – воздуховод; 8 – привод шнека; 9 – отверстия; 10 – нагревательный элемент; 11 – разделительные кольца; в) ЗКТ-3: 1 – кожух; 2 – теплоизолирующий материал; 3 – загрузочный бункер; 4 – выгрузное окно; 5 – транспортирующий рабочий орган (шнек); 6 – воздуховод; 7 – винтовые опоры; 8 – кольца; 9, 10 – нагревательные элементы; 11 – вентилятор; 12 – патрубок; 13 – привод шнека; г) ЗКТ-4: 1 – кожух, 2 – теплоизолирующий материал, 3 – загрузочный бункер, 4 – выгрузное окно, 5 – транспортирующий рабочий орган, 6 – нагревательные элементы, 7 – вентилятор, 8 – воздуховод, 9 – греющая пластина, 10 – заслонка-отсекатель

ключается в том, что её воздуховод установлен перпендикулярно кожуху и соединён с его внутренней полостью между загрузочным бункером и выгрузным окном на равном расстоянии от них. Опоры выполнены с возможностью регулирования по высоте. Эти особенности её конструкции обеспечивают эффективное использование при сушке зерна большинства сельскохозяйственных культур, имеющих различные коэффициенты трения, что повышает универсальность устройства [6, 7].

Принципиальное конструктивное отличие ЗКТ-4 от представленных выше устройств заключается в следующем. Кожух установки прямоугольного сечения, а транспортиру-

ющий рабочий орган выполнен в виде бесконечной цепи со скребками. Внутри кожуха горизонтально установлена греющая пластина, на которую опирается верхняя ветвь цепи со скребками. Нагревательные элементы размещены между загрузочным бункером и выгрузным окном с нижней стороны греющей пластины. Для обеспечения движения зерна единичным слоем в кожухе установлена заслонка-отсекатель (рисунок 1 г). Выполнение кожуха прямоугольного сечения, обеспечение качественной теплоизоляции его наружной поверхности, использование скребкового транспортирующего органа, а также возможность регулирования температуры нагрева греющей пластины – все это обеспе-

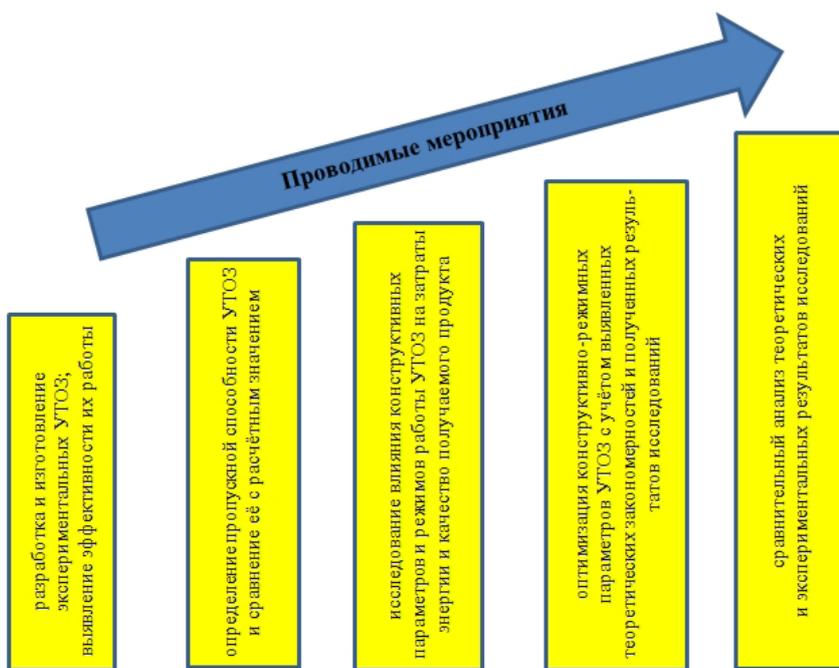


Рис. 2 – Программа исследований ЗКТ в лабораторных условиях

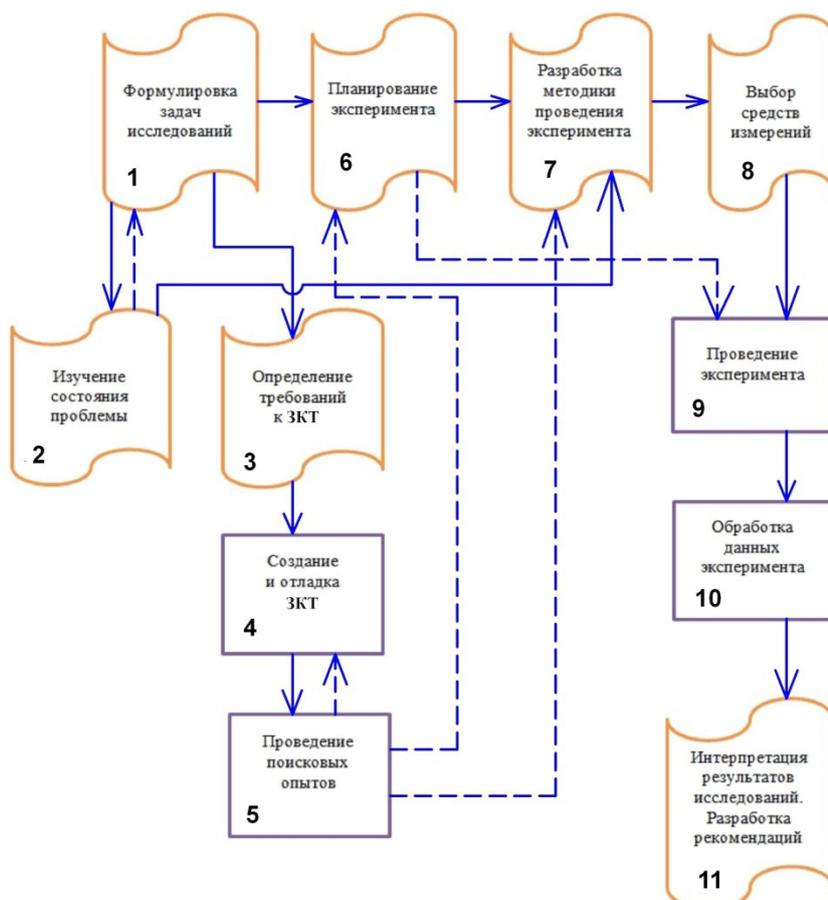


Рис. 3 - Блок-схема алгоритма экспериментальных исследований процесса сушки зерна в ЗКТ

чивает требуемую равномерность тепловой обработки зерна, а также снижает энергозатраты на процесс теплового воздействия [8 - 14].

Объекты и методы исследований

Для оптимизации режимов работы предложенных зерносушилок была принята следующая программа экспериментальных исследований (рис. 2).

Основная цель такой оптимизации – снизить затраты энергии на сушку зерна при поддержании заданной пропускной способности и сохранении качества обрабатываемого продукта.

На рисунке 3 приведена блок-схема алгоритма экспериментальных исследований процесса сушки зерна.

В соответствии с поставленными задачами исследования процессы тепловой обработки зерна проводили поэтапно в установленном порядке. Этапы исследований пронумерованы согласно порядку их выполнения, причём типовые потоки информации указаны сплошными линиями со стрелками, а нетиповые – пунктирными.

Для обоснования оптимальных режимов работы зерносушилки контактного типа, помимо температуры поверхности теплообменника, необходимо знать и характер распределения температуры по объёму зерновой массы, находящейся в контакте с нагретой поверхностью, т.к. эта величина ограничивается технологи-

ческими условиями. Повышения скорости передачи теплоты от кожуха установки к материалу можно добиться использованием в установке контактного принципа теплообмена и организацией движения зерна слоем, толщина которого незначительно превышает размеры единичного зерна, что в несколько раз увеличивает коэффициент теплоотдачи.

При исследовании процесса сушки ограничимся рассмотрением явлений перемещения влаги с поверхности зерна в окружающий воздух, так как они в основном раскрывают механизм процесса сушки.

Влага, поступившая из внутренних слоёв зерна к его поверхности, удаляется испарением. Испарение влаги с поверхности материала аналогично её испарению со свободной поверхности.

Интенсивность испарения влаги, кг/(м²·ч),

$$m = \alpha_m (p_M - p_{II}) \frac{p_0}{p}, \quad (1)$$

где α_m - коэффициент влагообмена между поверхностью влажного материала и окружающим воздухом, кг/(ч·Н), зависящий главным образом от скорости и направления движения воздуха; p_M и p_{II} - парциальные давления водяного пара соответственно у поверхности материала и в окружающей среде (воздух), Па; p_0 - нормальное атмосферное давление, Па; p - барометрическое давление, Па.

Так как при контактной сушке температурный градиент невелик и влага внутри зерна перемещается вследствие теплопроводности, на основании закона сохранения вещества можно записать:

$$k\rho_0(\nabla u)_{II}F = \alpha_m(p_M - p_{II})\frac{p_0}{p}F = \frac{dm}{d\tau}, \quad (2)$$

где k - коэффициент теплопроводности материала, м²/ч; ρ_0 - плотность абсолютно сухого материала, кг/м³; F - поверхность испарения, м²; $(\nabla u)_{II}$ - градиент концентрации влаги у поверхности зерна, кг/(кг сухого вещества·м); m - масса испарённой влаги, кг;

τ - экспозиция сушки, с.

Уравнение (2) выражает в общем виде зависимость скорости сушки от скорости перемещения влаги у поверхности зерна и скорости диффузии пара через пограничный слой.

Учитывая явления теплопроводности и термовлагопроводности, можно записать, что

$$i = i_{II} + i_T = -k\rho_0\nabla u - k\rho_0\delta\nabla t, \quad (3)$$

или

$$i = -k\rho_0(\nabla u + \delta\nabla t), \quad (4)$$

где i , i_{II} и i_T - плотности потока влаги соответственно общая, вызванная действием градиента концентрации влаги и вызванная действием градиента температуры, кг/(м²·ч); ∇u - градиент концентрации влаги, кг/(кг сух. вещества·м); $\delta = \delta u/\delta t$ - коэффициент термовлагопроводности материала, град⁻¹; ∇t - градиент температуры, °С/м.

Установим зависимость между температурой нагрева зерна и скоростью сушки. Количество теплоты, Дж, переданное от стенки кожуха зерносушилки к зерну,

$$Q = \alpha S(t_K - t_3), \quad (5)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²·ч·град); S - площадь поверхности контакта зерна с кожухом, м²; t_K , t_3 - соответственно температура кожуха и зерна, °С.

Часть теплоты расходуется на испарение влаги, а часть - на прогрев влажного зерна:

$$Q = \int_{(V)} c\gamma \frac{dt}{d\tau} dv_s + r \frac{dm}{d\tau}, \quad (6)$$

где c - удельная теплоёмкость зерна, Дж/(кг·град); γ - насыпная плотность зерна, кг/м³; V - объём зернового материала в тепловой камере, м³; r - скрытая теплота испарения или теплота десорбции, Дж/кг; v_s - скорость воздуха в тепловой камере, м/с.

Используя уравнения (5) и (6), получим:

$$r \frac{dm}{d\tau} \frac{1}{100} + \left(c + \frac{m}{100}\right) \frac{dt_{cp}}{d\tau} = \frac{\alpha S}{m_c} (t_K - t_3)_{cp}, \quad (7)$$

где m_c - масса абсолютно сухого материала, кг.

Соотношение (7) является основным уравнением контактной сушки; оно связывает скорость сушки ($dm/d\tau$), скорость прогрева ($dt_{cp}/d\tau$) и температуру нагрева зерна t_3 .

Таким образом, зная среднюю арифметическую температуру нагрева зерна и время сушки, можно определить все необходимые величины, входящие в основное уравнение сушки.

Результаты исследований

Проведённые экспериментальные исследования позволили выявить оптимальные режимы работы разработанных зерносушилок [15].

Обосновано, что наиболее высокая равномерность сушки зерна без снижения его посевных свойств (энергии прорастания, всхожести) достигается в контактных установках с использованием винтового транспортирующего рабочего органа (шнека).

При необходимости качественной сушки небольших партий семенного зерна целесообразно использовать ЗКТ-3, в которой помимо обеспечения высокой равномерности тепловой обработки достигается наиболее равномерный и качественный отвод испаряющихся из зерна паров влаги. При этом минимальные суммарные энергозатраты в ЗКТ-3 на процесс удаления влаги из зерна составляют 3,75 МДж/кг и достигаются при средней температуре греющей поверхности равной 54°C, скорости движения зерна – 0,028 м/с (экспозиция сушки - 90 с), скорости движения воздуха - 1,7 м/с, температуре воздуха, подаваемого в сушильную камеру, 24°C. Пропускная способность ЗКТ-3 на указанных значениях режимных параметров составляет 350 кг/ч, что вполне удовлетворяет требованиям фермерских хозяйств при обработке семенного материала. Разовый влагосъём находился в пределах 2,7...3,3%, а температура зерна на выходе из ЗКТ-3 не превышала 38°C, что положительно сказывается на посевных свойствах зерна.

В случае же сушки зерна на продовольственные и фуражные цели целесообразнее использовать ЗКТ-4 со скребковым транспортирующим рабочим органом. При этом равномерность и качество сушки зерна

незначительно снижаются, однако благодаря конструктивным особенностям транспортирующего рабочего органа возможно значительное повышение пропускной способности установки. Оптимальные значения режимных параметров для ЗКТ-4 следующие: средняя температура греющей поверхности $t_{п\text{ опт}} = 87^\circ\text{C}$, скорость движения воздуха в установке $v_{в\text{ опт}} = 1,33$ м/с, скорость движения зерна $v_{з\text{ опт}} = 0,045$ м/с (экспозиция сушки – 48 с). Минимальные суммарные удельные затраты энергии на испарение влаги из зерна при оптимальных режимах $q_{\text{опт}} = 3,82$ МДж/кг, а разовый влагосъём – 3...3,5% при пропускной способности 500 кг/ч.

Выводы

Таким образом, использование контактного способа подвода теплоты является перспективным направлением совершенствования зерносушилок.

Полученные теоретические закономерности отражают основные характерные черты контактной сушки зерна. Их можно использовать для расчёта температурного поля обрабатываемого зернового слоя. Установлено, что физическую сущность механизма контактного способа передачи теплоты определяют взаимосвязанные переносы теплоты, пара и жидкости.

При использовании разработанных средств механизации на оптимальных режимах повышается энергоэффективность процесса сушки зерна при обеспечении заданной пропускной способности и требуемом качестве обрабатываемого зерна.

Библиографический список

1. Курдюмов, В.И. Повышение эффективности послеуборочной обработки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин // Доклады Россельхозакадемии. - 2011. - № 6. - С. 56-58.
2. Курдюмов, В.И. Теоретические и экспериментальные аспекты контактного способа передачи теплоты при сушке зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2011. - № 3. - С. 106-110.
3. Курдюмов, В.И. Обоснование тепло-

физических параметров установки для сушки зерна контактного типа / В.И. Курдюмов, Карпенко Г.В., Павлушин А.А., Карпенко М.А. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научное обеспечение устойчивого функционирования и развития АПК». - 2009. С. 84-87.

4. Пат. 59226 Российская Федерация, МПК F26B17/20. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 19.04.2006; опубл. 10.12.2006 г. Бюл. № 34.

5. Пат. 2323580 Российская Федерация, МПК A23B9/08. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, Г.В. Карпенко, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 28.03.2006; опубл. 10.05.2008 г. Бюл. № 13.

6. Пат. 2428642 Российская Федерация, МПК F26B11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 14.04.2010; опубл. 10.09.2011 г. Бюл. № 25.

7. Пат. 2371650 Российская Федерация, МПК F26B11/14. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.Н. Зозуля; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 18.02.2008; опубл. 27.10.2009 г. Бюл. № 30.

8. Пат. 90970 Российская Федерация, МПК A23B9/08. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 07.10.2009; опубл. 27.01.2010 г. Бюл. № 3.

9. Пат. 2436630 Российская Федерация, МПК B02B1/00. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутя-

гин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 31.05.2010; опубл. 20.12.2011 г. Бюл. № 35.

10. Пат. 2465527 Российская Федерация, МПК F26B17/04. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 13.05.2011; опубл. 27.10.2012 г. Бюл. № 30.

11. Пат. 2428642 Российская Федерация, МПК F26B 11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 14.04.2010; опубл. 10.09.2011 г. Бюл. № 25.

12. Пат. 2453123 Российская Федерация, A23B 9/08. Устройство для сушки пищевых продуктов / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 10.11.2010; опубл. 20.06.2012 г. Бюл. № 17.

13. Пат. 96639 Российская Федерация, F26B 3/00. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.А. Постников; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 24.02.2010; опубл. 10.08.2010 г. Бюл. № 22.

14. Пат. 119862 Российская Федерация, F26B 11/16. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульяновская ГСХА».- Заявл. 11.01.2012; опубл. 27.08.2012 г. Бюл. № 24.

15. Курдюмов, В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа // В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин: монография. – Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.