

УДК 631.365.22

ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКА ТЕПЛОТЫ ДЛЯ ЗЕРНОСУШИЛОК ШАХТНОГО ТИПА

^{1,2}Андрианов Н.М., ²Мэй Шуньчи, ²Ли Джен

¹Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Великий Новгород,
e-mail: novsu@novsu.ru;

²Уханьский текстильный университет, Ухань, Китай, e-mail: wb@wtu.edu.cn

На основе экспериментальных данных выполнен анализ динамики процессов регулирования тепловых режимов в сушилках с гравитационным движущимся слоем. В качестве объекта управления сушилка является сложной динамической системой. Это многосвязный, распределенный динамический объект, обладающий значительной инерционностью и транспортным запаздыванием. Его статические характеристики нелинейные. Установлено, что влажность и скорость перемещения зернового слоя влияют на его аэродинамическое сопротивление. В условиях производства их изменение возбуждает значительные колебания потока газа и теплоты в камеру сушки, что ведет к колебаниям температуры зерна. В связи с этим, стабилизация температуры теплоносителя не обеспечивает стабилизацию температуры зерна. Для лучшей стабилизации режимов предложена система регулирования количества теплоты в сушильной камере. Система включает контур регулирования температуры и контур регулирования скорости газа, работа которых обеспечивает стабилизацию потока теплоты.

Ключевые слова: зерносушилка шахтная, режимы сушки, регулирование, оптимизация.

RATIONALE OF SYSTEM OF STABILIZATION THE HEAT FLOW FOR GRAIN DRYERS OF MINE TYPE

^{1,2}Andrianov N.M., ²Mei Shunqi, ²Li Zhen

¹Novgorod State University, Veliky Novgorod, e-mail: novsu@novsu.ru;

²Wuhan Textile University, Wuhan, China, e-mail: wb@wtu.edu.cn

On the basis of experimental data the analysis of dynamics of processes of regulation of thermal regimes in dryers with a gravitational moving layer is made. As the object of control, the dryer is a difficult dynamic system. This is the multiply connected, the distributed dynamical object with considerable inertia and with transport lag. Its static characteristics are nonlinear. It is established, that the humidity and velocity of the grain layer affect its aerodynamic resistance. In the manufacturing conditions, their changing excite considerable fluctuation of the gas flow and the heat in the camera of dryer, leading to fluctuations in the temperature of grain. In this connection, it is established that stabilization of temperature of the heat carrier does not provide stabilization of temperature of grain. For the best stabilization of regimes, the system of regulation of amount of heat in the camera of dryer is offered. The system includes a control loop of temperature and a control loop of speed of gas, whose works provide stabilization of heat flow.

Keywords: mine grain-dryer, drying regimes, regulation, optimization.

Для стабилизации режимов сушки современные сушилки оснащают автоматическими регуляторами температуры теплоносителя [12], однако, как показывает практика [1, 6, 14], качество их работы остается низким. Изменчивость механических характеристик зернового слоя существенно влияет на подачу теплоносителя в камеру сушки [1-6], что при стабилизированной температуре ведет к колебаниям потока тепловой энергии и возбуждает колебания температуры зерна. В известной литературе сведений о влиянии регулятора температуры теплоносителя на динамику функционирования зерновых сушилок с гравитационным движущимся слоем имеется недостаточно.

Цель исследования. Дополнительное изучение динамики процессов, протекающих в рабочих камерах зерновых сушилок, оснащенных системой стабилизации температуры теплоносителя. Разработка методов и средств повышения эффективности их работы.

Материал и методы исследования

Анализ динамики процессов регулирования выполнен на основе экспериментальных данных, полученных в результате исследований работы шахтной сушилки СЗШ-8, с использованием методов статистической динамики и автоматического регулирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Особенностью зернового слоя, перемещающегося под действием гравитационных сил, является зависимость его физико-механических характеристик от начальных параметров обрабатываемого материала и задаваемого режима движения. Для сушилок шахтного типа [1-6] установлено, что аэродинамическое сопротивление слоя и скорость течения газа в нем зависят от влагосодержания и скорости перемещения зерна по камере сушки. Так, с уменьшением влагосодержания от 30 до 14% скорость газа в слое при постоянном давлении вентилятора

уменьшается на 8 – 19%. Это объясняется тем, что уменьшение влагосодержания вызывает усадку зерновок и обуславливает их более компактную укладку, что ведет к увеличению аэродинамического сопротивления слоя. Изменение влагосодержания зерна в процессе сушки может приводить к заметному перераспределению потоков газа по высоте сушильной камеры [7].

С увеличением скорости перемещения слоя от 0 до 8 мм/с скорость газа в нем возрастает на 7 – 21%. Это объясняется увеличением работы сил трения между зерновками, что ведет к разуплотнению слоя и, как следствие, к уменьшению его аэродинамического сопротивления. Работа сил трения с увеличением влагосодержания зерновок еще более возрастает, поскольку увеличивается шероховатость их поверхности. Поэтому совокупное влияние указанных переменных обуславливает изменение скорости газа в зерновом слое в интервале 19 – 25%.

В условиях производства начальное влагосодержание и скорость перемещения зернового слоя изменяются в широких пределах [8, 9, 14], что обуславливает изменение его аэродинамического сопротивления и вызывает существенные колебания массовой подачи теплоносителя в камеру сушки, поскольку давление вентилятора поддерживается постоянным. При стабилизированной температуре теплоносителя это ведет к

колебаниям потока тепловой энергии и возбуждает колебания температуры зерна.

Изменение аэродинамических характеристик зернового слоя в процессе сушки сказывается на изменении температуры зерна, как в отдельных зонах сушильной камеры, так и по ее высоте [7, 9, 13]. На рис. 1 показаны зависимости температуры зерна θ_z от его влагосодержания W и скорости перемещения V . Видно, что влияние переменных W и V на температуру зерна в различных зонах по высоте камеры сушки различно. На уровне 2-го, 4-го и 6-го ряда коробов с увеличением W температура зерна увеличивается (рис. 1, а), а на уровне 10-го, 12-го и 15-го ряда происходит её понижение.

Это связано с одновременным протеканием двух процессов – изменением аэродинамического сопротивления слоя по мере высыхания и постепенным перераспределением составляющих теплового баланса. Так, увеличение влагосодержания W приводит к увеличению размеров зерновок (вследствие набухания), что вызывает увеличение пористости слоя, и сопровождается снижением его аэродинамического сопротивления. Это ведет к автоматическому увеличению подачи теплоносителя и обуславливает пропорциональное увеличение количества теплоты подводимой к зерну. В связи с этим повышается его температура в начальных зонах камеры сушки (рис. 1, а).

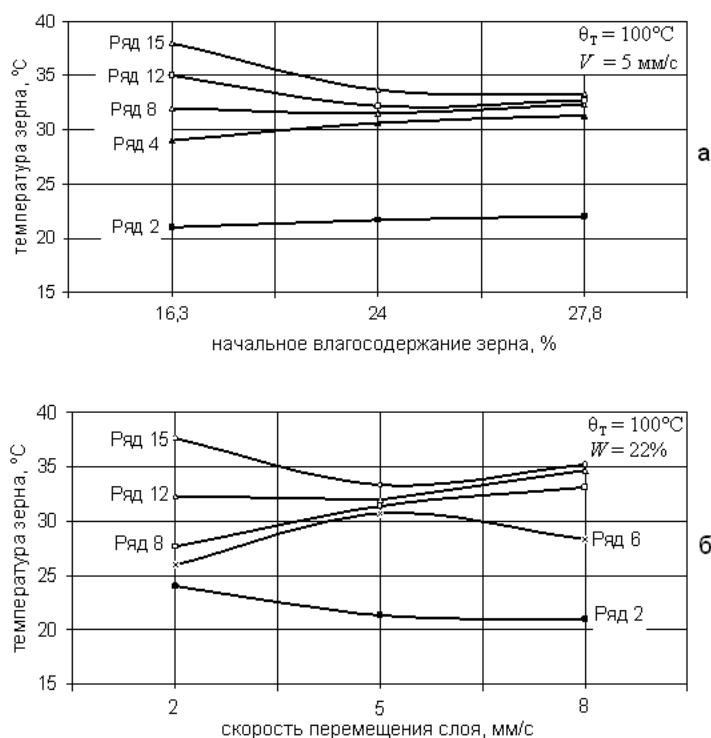


Рис. 1. Зависимость температуры зерна от его начального влагосодержания (а) и скорости перемещения (б)

По мере снижения влагосодержания W в нижних зонах меняется характер изменения температуры зерна. На процесс перераспределения потоков газа накладывается процесс перераспределения составляющих теплового баланса. Доля теплоты, затрачиваемая на испарение из зерна влаги, уменьшается, но за счет этого прирастает составляющая, затрачиваемая на его нагрев, поэтому температура зерна интенсивно увеличивается.

Еще более заметное влияние на температуру зерна θ_3 оказывает изменение скорости перемещения слоя V . Из протекания зависимостей (рис. 1, б) видно, что с увеличением V монотонно возрастает θ_3 на уровне 8-го и 12-го ряда коробов. Это объясняется непрерывным увеличением работы сил трения между зерновками и уменьшением вследствие этого аэродинамического сопротивления слоя, что ведет к автоматическому увеличению подачи теплоносителя и теплоты в зерновой слой и, как следствие, к повышению его температуры.

На уровне 2-го и 4-го ряда коробов картина качественно иная, поскольку домини-

рующее влияние на нагрев зерна здесь оказывает тепловая инерционность слоя.

В нижних зонах камеры сушки (15-й ряд коробов) при малом влагосодержании зерна его нагрев протекает с доминирующим влиянием процесса перераспределения составляющих теплового баланса. Доля теплоты на испарение влаги сокращается, но за счет этого возрастают затраты теплоты на нагрев зерна, поэтому его температура интенсивно повышается.

Изменение коэффициентов передачи по каналам преобразования сигналов $W - \theta_3$ и $V - \theta_3$ (рис. 2) также подтверждает нелинейный характер влияния переменных W и V на температуру зерна θ_3 . Их значения имеют знакопеременный характер изменения по высоте камеры сушки, чем объясняется то, что в одних зонах изменение переменных W и V может вызывать положительные приращения температуры зерна, а в других – отрицательные, причем значения коэффициентов изменяются не только по высоте камеры, но и зависят от значений самих переменных W и V .

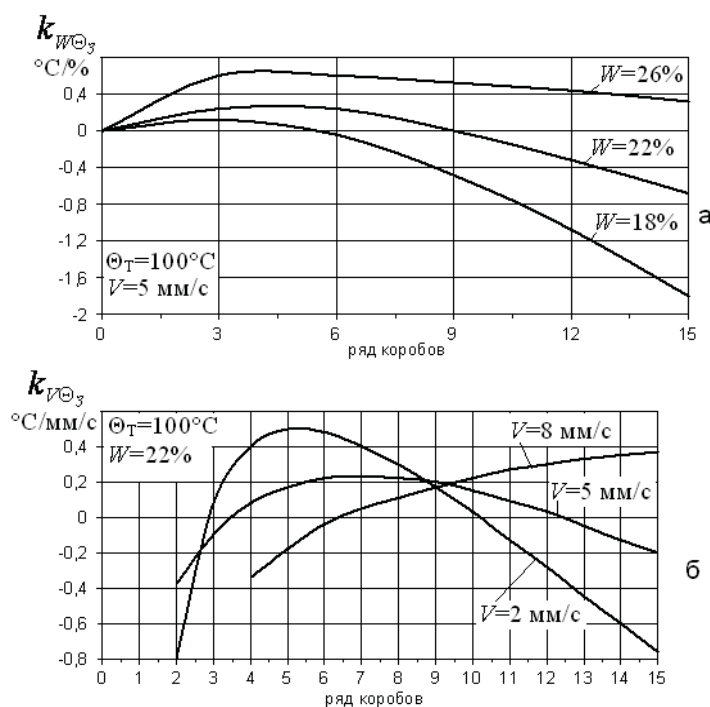


Рис. 2. Изменение коэффициентов передачи по высоте камеры сушки в зависимости от начального влагосодержания зерна (а) и скорости его перемещения (б)

Наибольших значений коэффициенты передачи достигают в нижнем горизонтальном сечении камеры сушки (15-й ряд коробов), чем подтверждается то, что в этой зоне наблюдаются наибольшие и наиболее опасные приращения температуры зерна. Из

анализа абсолютных значений коэффициентов следует, что наиболее опасными являются режимы сушки зерна при низких значениях W и V .

Это подтверждается также зависимостями, приведенными на рис. 3. Из их протекания

ния видно, что нелинейный и знакопеременный характер влияния переменных W и V на температуру зерна наблюдается не только по высоте камеры сушки, но и в ее отдельных зонах, а наибольшие значения температуры θ_3 соответствуют наименьшим значениям W и V .

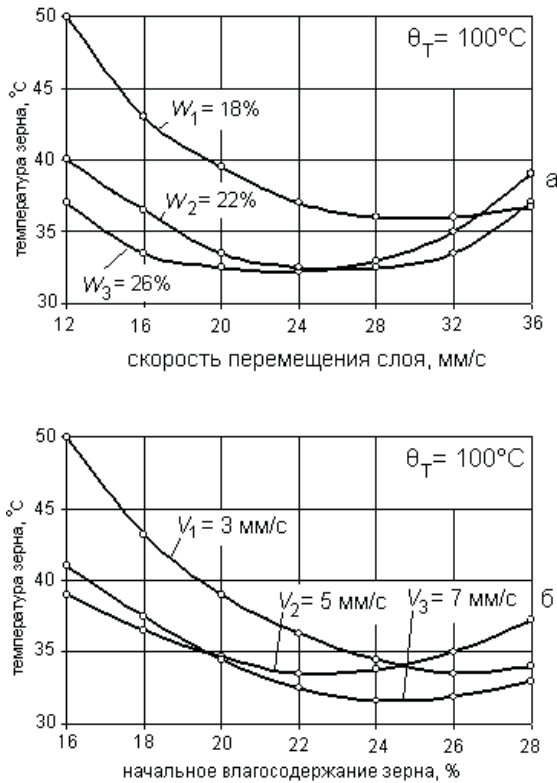


Рис. 3. Изменение температуры зерна на выходе камеры сушки в зависимости от его начального влагосодержания (а) и скорости перемещения (б) при постоянной температуре теплоносителя

Характерной особенностью протекания зависимостей (рис. 1, 2 и 3) является то, что при высоких значениях влагосодержания (22% и выше) положительные приращения переменных W и V ведут к положительным приращениям температуры зерна в камере сушки. Это можно объяснить только влиянием изменчивости аэродинамических характеристик подвижного зернового слоя при стабилизированной температуре теплоносителя.

Реакции изменения температуры зерна на скачкообразное приращение скорости перемещения зернового слоя представлены на рис. 4. Особенностью их протекания является кратковременное интенсивное повышение температуры зерна в начале переходного процесса. Это объясняется скачкообразным уменьшением аэродинамического

сопротивления зернового слоя, что ведет к автоматическому увеличению подачи теплоносителя и теплоты в камеру сушки. Вследствие этого температура зерна возрастает. Превышение температуры $\Delta\theta_3$ может достичь 2 – 8°C и стать опасным для качественных показателей зерна. Причем большие значения $\Delta\theta_3$ соответствуют большим значениям переменных W и V . На втором этапе переходного процесса заметную роль начинают оказывать более инерционные процессы тепло- и массопереноса, поэтому с увеличением влагосодержания зерна его температура постепенно понижается.

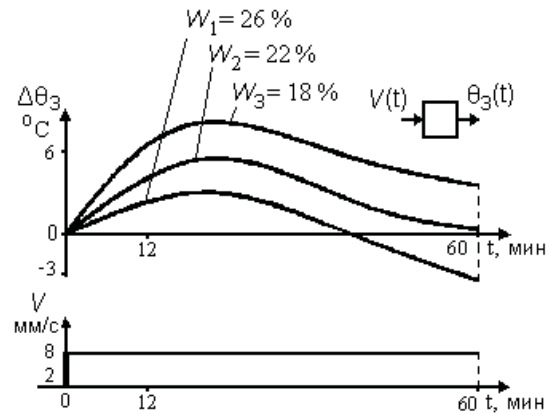


Рис. 4. Переходные процессы на выходе камеры сушки, возбужденные изменением скорости перемещения V зернового слоя при температуре теплоносителя $\theta_T = 100^\circ\text{C}$

При высоких влажностях ($W > 24\%$) установившаяся температура зерна в конце переходного процесса может быть выше начальной, а при меньших ($W < 22\%$) – ниже. Это является следствием нелинейности статических характеристик камеры сушки (рис. 2 и 3). Неоднозначные приращения температуры зерна при изменении скорости перемещения слоя V свидетельствуют о невозможности использования экспозиции сушки для управления его температурой.

Динамические свойства камеры сушки для учета особенностей протекания переходных процессов по каналу преобразования сигналов $V - \theta_3$ могут быть аппроксимированы уравнением динамического звена третьего порядка [10, 11].

Возможные отклонения температуры зерна по высоте камеры сушки, вызванные колебаниями его начального влагосодержания и скорости перемещения, представлены в таблице. Из нее следует, что стабилизация температуры теплоносителя не обеспечивает стабилизацию температуры зерна и не исключает возможности его перегрева.

Отклонения температуры зерна, вызванные изменением его начального влагосодержания и скорости перемещения, в сушилке СЗШ–8 с системой стабилизации температуры теплоносителя

Варьируемый фактор	Интервал изменения	Интервал отклонения температуры зерна, °С					
		4-й ряд коробов	6-й ряд коробов	8-й ряд коробов	10-й ряд коробов	12-й ряд коробов	15-й ряд коробов
Влагосодержание, %	14 – 30	4,83	4,78	3,75	8,34	13,88	19,66
Скорость перемещения, мм/с	2 – 8	7,28	6,49	7,26	8,51	9,12	15,44

Отмеченный характер изменения статических и динамических характеристик сушилок указывает на недостатки применения систем стабилизации температуры теплоносителя, так как стабилизация температуры при возможных колебаниях его подачи ведет к колебаниям количества теплоты, подводимой к зерну, и не способствует стабилизации тепловых режимов. Наиболее целесообразным для повышения стабильности тепловых режимов является реализация принципа стабилизации количества теплоты, подаваемой в сушильную камеру [15].

Построение такой системы может быть реализовано в соответствии со схемой, показанной на рис. 5. Она содержит камеру сушки 1, в которой скорость перемещения зерна регулируется устройством 2. Теплоноситель, нагретый в теплогенераторе 3, подается в камеру сушки через диффузор 4, а удаляется из нее вентилятором через диффузор 5. Регулирование температуры теплоносителя осуществляется регулирующим органом 6, а скорости газа в зерновом слое – регулирующим органом 7. Система контроля температуры зерна включает датчик 8, задатчик 9, элемент сравнения 10 и устройство сигнализации 11.

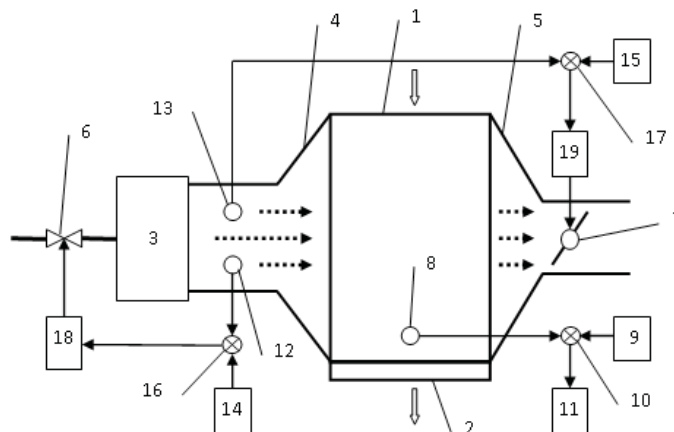


Рис. 5. Структурная функциональная схема системы стабилизации подачи теплоты в камеру сушки (обозначения в тексте)

⇒ – направление движения зерна; •••▶ – направление движения теплоносителя

Для стабилизации подачи теплоты в камеру сушки система оснащена двумя независимыми контурами: контуром регулирования температуры и контуром регулирования скорости теплоносителя. Каждый из контуров содержит датчик 12 (13), задатчик 14 (15) и элемент сравнения 16 (17), который через регулирующий прибор 18 (19) соединен с регулирующим органом, соответственно, температуры 6 или скорости газа 7.

Работа контуров обеспечивает одновременную стабилизацию температуры и массовой подачи теплоносителя в камеру сушки, чем обеспечивается стабилизация подачи теплоты. Использование системы позволяет исключить колебания потока теплоносителя, а следовательно, и теплоты на входе в камеру сушки и осуществлять регулирование тепловых режимов в ней с меньшей погрешностью, чем достигается лучшее качество выполнения рабочего процесса.

Заключение

Сушильная камера как объект управления тепловым режимом представляет собой сложную динамическую систему. Это многосвязный, распределенный динамический объект, обладающий значительной инерционностью, транспортным запаздыванием и нелинейными статическими характеристиками. Стохастическое изменение начальных параметров зернового вороха и управляющих воздействий возбуждает колебания подачи теплоты в камеру сушки и ведет к существенным колебаниям температуры зерна. В связи с этим, стабилизация температуры теплоносителя не обеспечивает стабилизацию температуры зерна. Для повышения точности регулирования необходимо применять систему стабилизации количества теплоты на входе в камеру сушки.

Список литературы

1. Андрианов Н.М., Галкин А.Д., Мэй Шунчи. Регулирование тепловых режимов в сушилках с гравитационным движущимся слоем // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 4. – С. 30-33.
2. Андрианов Н.М. Оптимизация структуры потоков газа и теплоты в шахтных зерносушилках // Хранение и переработка зерна. – 2010. – № 11. – С. 60-62.
3. Андрианов Н. М., Николаенко А. В. Совершенствование системы распределения газа шахтных зерносушилок // Вестник Новгородского государственного университета. – 2013. – № 71, Т. 2. – С. 4-7.
4. Андрианов Н.М. Оптимизация структуры потоков газа и теплоты в шахтных зерносушилках // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 2010. – Вип. 38, Т. 1. – С. 105-109.
5. Андрианов Н.М. Оптимизация системы распределения теплоносителя шахтных зерносушилок // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2008. – №10. – С. 160-164.
6. Андрианов Н.М. Оптимизация зерновых сушилок и их систем управления. Депонованная рукопись. ВИНТИ № 197-V2005 10.02.2005 г. – 299 с.
7. Андрианов Н.М. Совершенствование технологического процесса в шахтной зерносушилке // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 7. – С. 7-9.
8. Андрианов Н.М. Повышение эффективности функционирования зерновых сушилок // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 175-177.
9. Андрианов Н.М. Особенности работы зерновых сушилок // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 4. – С. 9-12.
10. Андрианов Н.М. Исследование шахтной зерносушилки как объекта управления // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 9. – С. 86-91.
11. Андрианов Н.М. Математическая модель сушильной камеры зерновых сушилок // Успехи современного естествознания. – 2003. – №11. – С. 14-17.
12. Колесов Л.В., Андрианов Н.М. Исследование средств управления температурой теплоносителя топочного агрегата // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 1. – С. 49-51.
13. Колесов Л.В., Андрианов Н.М. Экспериментальное обоснование совершенствования процесса сушки в шахтных зерносушилках // Сб. науч. тр. ЛСХИ «Методы и средства интенсификации технологических процессов на базе микроэлектроники». – Л., 1990. – С. 69-80.
14. Колесов Л.В., Андрианов Н.М. Исследование шахтной зерносушилки в условиях нормального функционирования // Сб. науч. тр. ЛГАУ «Интенсификация технологических процессов в растениеводстве». – Л., 1991. – С. 47-55.
15. Андрианов Н.М. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2135917. 1999. Бюл. №24.

References

1. Andrianov N.M., Galkin A.D., Mei Shunqi. Regulirovanie teplovykh rezhimov v sushilках s gravitacionnym dvizhushimsya sloem // Traktory i sel'hozmashiny. – 2014. – № 4. – P. 30-33.
2. Andrianov N. M. Optimizacija struktury potokov gaza i teploty v shahtnyh zernosushilках // Hranenie i pererabotka zerna. – 2010. – № 11. – P. 60 – 62.
3. Andrianov N. M., Nikolaenok A. V. Sovershenstvovanie sistemy raspredelenija gaza shahtnyh zernosushilok // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2013. – № 71, T. 2. – P. 4-7.
4. Andrianov N.M. Optimizacija struktury potokov gaza i teploty v shahtnyh zernosushilках // Naukovi pracі Odes'кої національної академії харчових технологій. Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 2010. – Vip. 38, T. 1. – P. 105-109.
5. Andrianov N. M. Optimizacija sistemy raspredelenija teplonositelja shahtnyh zernosushilok // Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2008. – №10. – P. 160-164.
6. Andrianov N. M. Optimizacija zernovyh sushilok i ih sistem upravlenija. Deponirovannaja rukopis'. VINITI № 197-V2005 10.02.2005 g. – 299 p.
7. Andrianov N. M. Sovershenstvovanie tehnologicheskogo processa v shahtnoj zernosushilке // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2004. – № 7. – P. 7-9.
8. Andrianov N.M. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija zernovyh sushilok // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2004. – № 2. – P. 175-177.
9. Andrianov N. M. Osobennosti raboty zernovyh sushilok // Tehnika v sel'skom hozjajstve. – 2006. – № 4. – P. 9-12.
10. Andrianov N. M. Issledovanie shahtnoj zernosushilki kak ob#ekta upravlenija // Uspеhi sovremennogo estestvoznanija. – 2004. – № 9. – P. 86-91.
11. Andrianov N. M. Matematicheskaja model' sushil'noj kamery zernovyh sushilok // Uspеhi sovremennogo estestvoznanija. – 2003. – №11. – P. 14-17.
12. Kolesov L. V., Andrianov N. M. Issledovanie sredstv upravlenija temperaturaj teplonositelja topochnogo agregata // Tehnika v sel'skom hozjajstve. – 1988. – № 1. – P. 49-51.
13. Kolesov L. V., Andrianov N. M. Jeksperimental'noe obosnovanie sovershenstvovanija processa sushki v shahtnyh zernosushilках // Sb. nauch. tr. LSHI «Metody i sredstva intensifikacii tehnologicheskikh processov na baze mikrojelektroniki». L., 1990. – P. 69-80.
14. Kolesov L. V., Andrianov N. M. Issledovanie shahtnoj zernosushilki v uslovijah normal'nogo funkcionirovanija // Sb. nauch. tr. LGAU «Intensifikacija tehnologicheskikh processov v rastenievodstve». L., 1991. – P. 47-55.
15. Andrianov N. M. Sposob avtomaticheskogo regulirovanija processa sushki zerna i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija // Patent RF № 2135917. 1999. Bjul. №24.

Рецензенты:

Манасян С.К., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Механизации сельского хозяйства, Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск;
 Волховов М.С., д.т.н., профессор, проректор по учебной работе Костромской государственной сельскохозяйственной академии, Костромская область, п. Караваяво.
 Работа поступила в редакцию 29.07.2014.