

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ТЕПЛОТЫ НА ВХОДЕ В ЗЕРНОСУШИЛКУ

**Н. М. Андрианов^{1, 2}, А. Д. Галкин³, Мэй Шунчи², Сюе Юн²,
А. В. Николаенок¹, М. А. Иванов¹, А. С. Михайлов¹**

¹ Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,
г. Великий Новгород, Россия

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

³ Пермская государственная сельскохозяйственная академия
им. академика Д. Н. Прянишникова, г. Пермь, Россия

Установлено, что стабилизация температуры теплоносителя не обеспечивает стабилизацию температуры зерна. Значительные колебания подачи газа и теплоты в камеру сушки обусловлены изменением аэродинамических характеристик подвижного зернового слоя. Для лучшей стабилизации режимов предложена система регулирования количества теплоты в сушильной камере.

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

FLOW CONTROL OF HEAT ON INPUT TO THE GRAIN DRYER

**N. M. Andrianov^{1, 2}, A. D. Galkin³, Mei Shunqi², Xue Yong²,
A. V. Nikolaenok¹, M. A. Ivanov¹, A. S. Mikhailov¹**

¹ Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

³ Perm State Agricultural Academy, Perm, Russia

It is established that stabilization of temperature of the heat carrier does not provide stabilization of temperature of grain. Considerable fluctuations of feeding of gas and warmth in the camera of dryer are caused by change of aerodynamic characteristics of a moving grain layer. For the best stabilization of regimes is offered the system of regulation of amount of heat in the camera of dryer.

Ключевые слова: the dryer shaft, drying regimes, regulation, optimization

Введение. В современных сушилках стабилизацию режимов сушки осуществляют автоматическими регуляторами температуры теплоносителя [18], однако, практика показывает [1 – 7, 19], что качество их работы остается низким. Изменчивость механических характеристик зернового слоя существенно влияет на подачу теплоносителя в камеру сушки [1 – 7], что при стабилизированной температуре ведет к колебаниям потока тепловой энергии и возбуждает колебания температуры зерна. В известных источниках информации сведений о влиянии регулятора температуры теплоносителя на динамику функционирования зерновых сушилок с гравитационным движущимся слоем имеется недостаточно.

Цель исследования. 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 применением 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 – 7] 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 [13].

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 [14, 15], 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 [12 – 15, 19]. На рисунке 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 (рисунок

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 (рисунок 1, а).

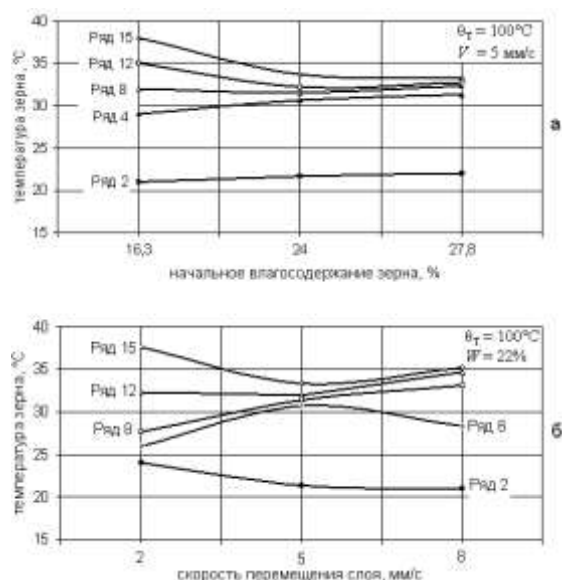


Рисунок 1 – Зависимость температуры зерна от его начального влагосодержания (а) и скорости перемещения (б)

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_z оказывает изменение скорости перемещения слоя V . Из протекания зависимостей (рисунок 1, б) видно, что с увели-

чением 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 доминирующее 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 $V - \theta_3$ (рисунок 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 .

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 рисунке 3. Из их протекания 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 .

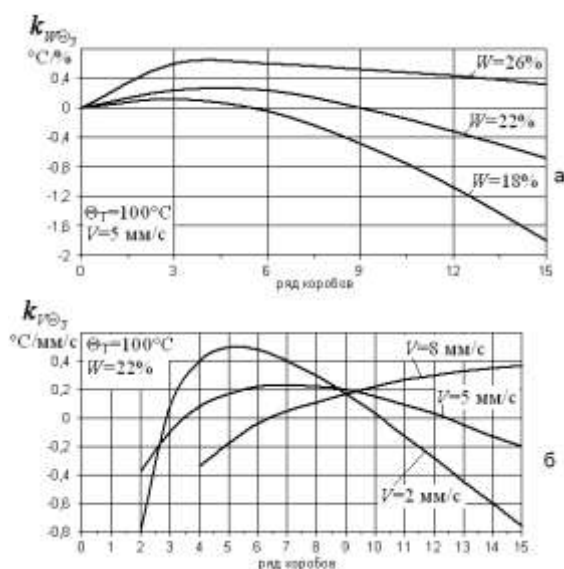


Рисунок 2 – Изменение коэффициентов передачи по высоте камеры сушки в зависимости от начального влагосодержания зерна (а) и скорости его перемещения (б)

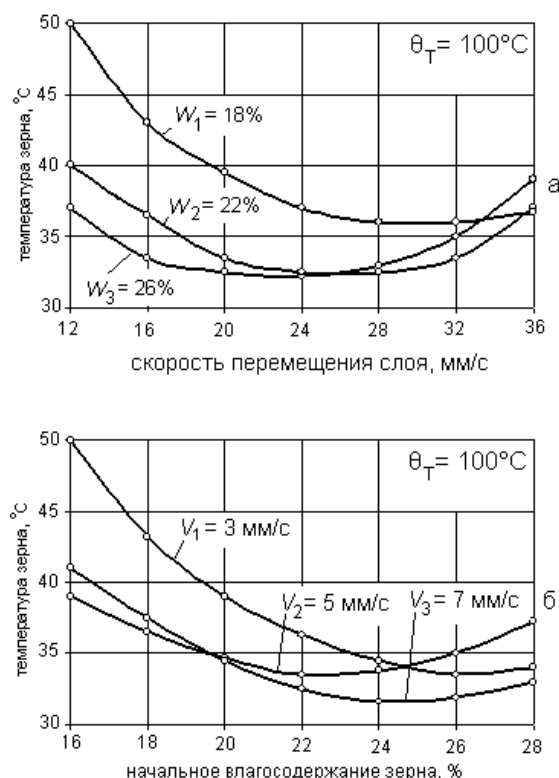


Рисунок 3 – Изменение температуры зерна на выходе камеры сушки в зависимости от его начального влагосодержания (а) и скорости перемещения (б) при постоянной температуре теплоносителя

Характерной особенностью протекания зависимостей (рисунки 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 рисунке 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 °С 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.

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 (рисунки 2 и 3). Неоднозначные приращения температуры зерна при изменении скорости пере-

мещения слоя V свидетельствует 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].

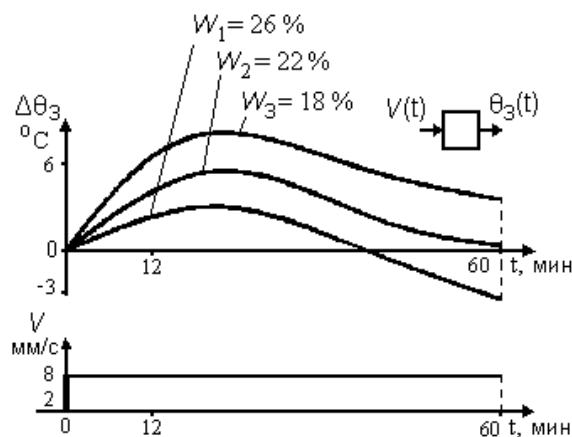


Рисунок 4 – Переходные процессы на выходе камеры сушки, возбужденные изменением скорости перемещения V зернового слоя при температуре теплоносителя $\theta_T = 100$ °С

Возможные отклонения температуры зерна по высоте камеры сушки, вызванные колебаниями его начального влагосодержания и скорости перемещения, представлены в таблице 1. Из нее следует, что стабилизация температуры теплоносителя не обеспечивает стабилизацию температуры зерна и не исключает возможности его перегрева.

Таблица 1 – 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 ре-

жимов является реализация принципа стабилизации количества теплоты, подаваемой в сушильную камеру [20].

Построение такой системы может быть реализовано в соответствии со схемой, показанной на рисунке 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.

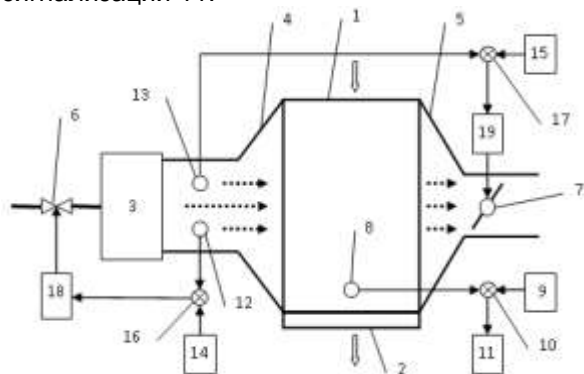


Рисунок 5 – Структурная функциональная схема системы стабилизации подачи теплоты в камеру сушки (обозначения в тексте):

==> – 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 осуществить 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. Регулирование тепловых режимов в сушилках с гравитационным движущимся слоем / Н. М. Андрианов и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 4. – С. 30–33.
2. Андрианов, Н. М. Тепловые режимы в шахтных зерносушилках / Н. М. Андрианов, А. Д. Галкин и др. // Сельский механизатор. – 2014. – № 9. – С. 12–13.
3. Андрианов, Н. М. Обоснование системы стабилизации потока теплоты для зерносушилок шахтного типа / Н. М. Андрианов, Шуньчи Мэй // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8 (часть 7). – С. 1518–1523.
4. Андрианов, Н. М. Контроль и регулирование температуры зерна в шахтных сушилках / Н. М. Андрианов, Шуньчи Мэй // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 8. – С. 9–13.
5. Андрианов, Н. М. Обоснование системы регулирования температуры зерна для сушилок шахтного типа / Н. М. Андрианов, Шуньчи Мэй // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11 (часть 2). – С. 259–265.
6. Андрианов, Н. М. Оценка статистических характеристик потока зернового вороха, поступающего в сушилку / Н. М. Андрианов, С.К. Манасян и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 2. – С. 20–22.
7. Андрианов, Н.М. Задание начальных условий и стохастической составляющей математической модели процесса сушки зерновых сушилок / Н. М. Андрианов, Шуньчи Мэй и др. // Ползуновский альманах. – 2014. – № 2. – С. 30–35.
8. Андрианов, Н. М. Оптимизация структуры потоков газа и теплоты в шахтных зерносушилках / Н. М. Андрианов и др. // Хранение и переработка зерна. – 2010. – № 11. – С. 60–62.
9. Андрианов, Н. М. Совершенствование системы распределения газа шахтных зерносушилок / Н. М. Андрианов, А. В. Николаенко и др. // Вестник

Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2013. – № 71, Т. 2. – С. 4-7.

10. Андрианов, Н. М. Оптимизация структуры потоков газа и теплоты в шахтных зерносушилках / Н. М. Андрианов // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 2010. – Вип. 38, Т. 1. – С. 105-109.

11. Андрианов, Н. М. Оптимизация системы распределения теплоносителя шахтных зерносушилок / Н. М. Андрианов и др. // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2008. – №10. – С. 160-164.

12. Андрианов, Н. М. Оптимизация зерновых сушилок и их систем управления / Н. М. Андрианов // Депонированная рукопись № 197-B2005 10.02.2005 г. – 299 с.

13. Андрианов, Н. М. Совершенствование технологического процесса в шахтной зерносушилке / Н. М. Андрианов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 7. – С. 7-9.

14. Андрианов, Н. М. Повышение эффективности функционирования зерновых сушилок / Н. М. Андрианов // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 175-177.

15. Андрианов, Н. М. Особенности работы зерновых сушилок / Н. М. Андрианов // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 4. – С. 9-12.

16. Андрианов, Н. М. Исследование шахтной зерносушилки как объекта управления / Н. М. Андрианов // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 9. – С. 86-91.

17. Андрианов, Н. М. Математическая модель сушильной камеры зерновых сушилок / Н. М. Андрианов // Успехи современного естествознания. – 2003. – №11. – С. 101-102.

18. Колесов, Л. В. Исследование средств управления температурой теплоносителя топочного агрегата / Л. В. Колесов, Н. М. Андрианов // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – № 1. – С. 49-51.

19. Андрианов, Н. М. Выбор режимов сушки зерна / Н. М. Андрианов // Сельский механизатор. – 2011. – № 8. – С. 8-9.

20. Андрианов, Н. М. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна и устройство для его осуществления / Н. М. Андрианов и др. // Патент РФ № 2135917. 1999. Бюл. №24.

Андрианов Николай Михайлович^{1,2} – д. т. н., профессор

Галкин Александр Дмитриевич³ – д. т. н., профессор

Мэй Шунчи² – кандидат технических наук, декан факультета механики и автоматики

Сюе Юн² – кандидат технических наук, доцент

Николаенок Андрей Валентинович¹ – аспирант

Иванов Максим Андреевич¹ – инженер, аспирант

Михайлов Александр Сергеевич¹ – студент

¹ ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород, Россия

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

³ ФГБОУ ВО «Пермская государственная сельскохозяйственная академия им. академика Д.Н. Прянишникова», г. Пермь, Россия