УДК 664.723

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА

ГЛУХАРЕВ Владимир Алексеевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И.Вавилова*

СИВИЦКИЙ Дмитрий Валерьевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И.Вавилова*

ПОПОВ Иван Николаевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И.Вавилова*

ВЕРЗИЛИН Андрей Александрович, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И.Вавилова*

Рассматриваются вопросы определения предельной температуры сушильного агента при сушке зерновых культур в зависимости от параметров процесса сушки, что позволит увеличить интенсивность процесса, сократить время сушки и снизить энергозатраты, но при этом обеспечить целостность зерна без растрескивания его поверхности от усушки. Выявлена возможность повышения температуры сушильного агента на 10...12 °С относительно существующих рекомендаций в период установившейся скорости сушки.

Введение. Для сохранения зерна на протяжении длительного времени требуется значительное количество затрат. Зерно должно пройти стадии многоуровневых действий: выращивание зерновых культур, сбор урожая, сушка зерна, хранение, помол зерна и изготовление хлебобулочного изделия. На качество хлеба влияют не только сортовые особенности культур и технология возделывания. Особо важным фактором выступает сохранность зерна на протяжении длительного времени, для обеспечения которой одной из самых важных стадий является сушка зерна [2]. Длительное хранение зерна, особенно при значительных урожаях, позволит реализовывать его экономически боле выгодно.

Технология сушки приобретает особое значение в естественных зонах возделывания с повышенной влажностью, где именно сушка считается более проблематичным звеном в послеуборочной обработке зерна. Так, при уборке урожая с повышенной влажностью зерновки именно правильная организация сушки зерна позволяет сохранить больший объем продукции и повысить его качество.

В настоящее время при наличии большого количества зерносушилок, а также разнообразия их видов отмечается нерациональное их использование и применение режимов, не способствующих интенсификации процесса сушки и поддержанию параметров зерна и сушильного агента в виде воздуха или его смеси с топочными газами, в соответствии с агротехническими требованиями на сушку. В результате чего расход топлива становится выше, а производительность зерносушилок ниже паспортных значений.

Задачей сушки является сохранение высокого качества убранного урожая зерновых культур и сокращение потерь зерна до минимума не только при самом процессе сушки, но и при его хранении [1].

Для того чтобы гарантировать высокое качество сушки, необходимо не только умелое эксплуатирование и бесперебойность работы зерносушильной техники, но и применение правильно подобранных режимов сушки, обеспечивающих высокую производительность установок, сохранение качества и лежкости зерна.

Цель исследования – определить оптимальный режим сушки зерна, характеризующийся зависимостью максимально допустимой температуры сушильного агента в процессе конвективной сушки от текущей влажности зерна, обеспечивающей сохранение целостности зерновки без возникновения микротрещин на поверхности и способствующей повышению производительности зерносушильной установки.

Методика исследований. В теоретических исследованиях применены методы системного анализа, многоуровневого имитационного моделирования, положения теории тепломассопереноса и теории сушки коллоидных капиллярнопористых тел, аэродинамики и теплотехники. Применялись так же элементы теории тепломассообмена [9].

При проведении экспериментальных исследований за основу были взяты методики проведения опытов и испытаний зерносушилок, государственные и отраслевые стандарты, требования и нормы метрологии, контроль качества технологических процессов, планирования, теория подобия и моделирования, теория испытаний.

Исследования проводили с использованием сушильной установки на различных сортах пше-

ницы твердых и мягких сортов. Для определения влажности зерна применяли анализатор влажности ЭВЛАС-2М. Перед каждым опытом зерно искусственно увлажняли до требуемых параметров. В процессе сушки пробы зерна отбирали каждые 5 мин. Дополнительно контролировали параметры температуры сушильного агента и температуру высушиваемой зерновой массы.

Результаты исследований. При теоретических исследованиях процессов сушки зерна в качестве факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на процесс сушки, принимались температура сушильного агента и скорость обдува зерна. Эти параметры оказывают наибольшее влияние на качество высушиваемого материала, температуру зерна и степень усушки, приводящую к появлению микротрещин на поверхности, а их оптимальное сочетание способно обеспечить качественный и экономичный процесс сушки с максимальным выходом зерна без потери его качества и сохранением его лежкости [5].

Закономерности процесса сушки влажного тела определяются одновременным протеканием ряда физических явлений переноса тепла и массы. Влияние температуры сушильного агента и скорости обдува на температуру поверхности зерна, которая является ограничением по условию сохранения качества зерна, выглядит следующим образом [3]:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{c}} - \sqrt{\frac{q_{\text{п}}}{A\,R\,e^{n}K^{m}\left(\frac{\omega}{\omega_{k}}\right)^{\sigma}\cdot\left(\frac{\rho}{B}\right)^{x}\cdot\left(\frac{\lambda_{B}}{l}\right)}\cdot(t_{\text{c}}-t_{0})} \qquad (1)$$

где $t_{\text{п}}$ – температура на поверхности тела (зерновки); t_{c} – температура сушильного агента; q_{n} – интенсивность подвода тепла; A коэффициент, в котором учтено число Pr = const; Re^{n} – число Рейнольдса K^{m} – критерий, который определяет увеличение коэффициента теплоотдачи за счет турбулизации воздушного потока парами, образующимися у поверхности материала;

$\left(\frac{\omega}{\omega_{k}}\right)^{\sigma}$ – параметрический критерий представляет собой отношение влажности материала в периоде падающей скорости сушки к критической влажности; $\left(\frac{\rho}{B}\right)^{x}$ – соотношение, учитывающее условие сложного тепло и массообмена при вакуумной сушке материалов и представляет собой отношение давления окружающей среды к барометрическому давлению; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности влажного воздуха; l –длина поверхности тела вдоль потока сушильного агента.

Теоретическими исследованиями предлагаемых режимов сушки была выявлена оптимальная скорость обдува сушильным агентом, которая составила порядка 1 м/с не зависимо от температуры сушильного агента, что соответствует существующим рекомендациям [8]. Такая скорость обдува сушильным агентом обеспечивает не только подвод достаточного количества тепла к зерновке для испарения влаги, но и своевременное ее удаление, что способствует поддержанию температуры зерна на приемлемом уровне.

Предельная температура сушильного агента, с одной стороны, ограничивается температурой зерна, которая растет вместе с ростом температуры сушильного агента, с другой – перепадом влажности между поверхностью и центром зерновки, приводящим к появлению трещин на поверхности зерна. При сушке зерна происходит разрушение его структуры вследствие развития в зерне объемно-напряженного состояния, обусловленного неравномерным распределением влаги по аналитическим частям зерна и разной скоростью ее удаления и, как следствие, образование микротрещин зерновки. Появляющиеся в процессе сушки трещины могут находиться внутри эндосперма или выходить на поверхность, при этом могут быть повреждены алейроновый слой, а затем и оболочки. В свою очередь, появление трещин на поверхности зерновки приводит к ухудшению лежкости зерна [10].

Неравномерность усушки зерна при изменении его влажности в свою очередь также зависит от температуры сушильного агента и приводит к возникновению напряжений в зерновке [7]:

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_{r}(r) &= \frac{E}{1-\mu^{2}}\,f(r)\,\vartheta(r)\\
\sigma_{q} &= \frac{E}{1-\mu^{2}}\left[f(r)\left(\frac{d\vartheta}{dr}(r)-(1+f(r))\,\vartheta(r)\right)\right]\\
\sigma_{z}(r) &= \frac{E}{1-\mu^{2}}\left[f(r)\left(\frac{d\lambda}{dr}(r)-\lambda(r)\right)\right]
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где

$$\left.\begin{aligned}
f(r) &= \frac{1}{2}\left(\frac{R^{2}}{r^{2}}-1\right)\\
\vartheta(r) &= \varepsilon_{\theta 2}(r)+\mu\,e_{z2}(r)\\
\lambda(r) &= e_{z2}(r)+\mu\,e_{\theta 2}(r)
\end{aligned}\right\}$$

где r – радиус зерновки, на котором определяется напряжение; E – модуль упругости зерновки; μ – коэффициент Пуассона, R – наружный радиус зерновки; $\varepsilon_{\theta 2}(r)$ и $\varepsilon_{z2}(r)$ – деформации от усадки в окружном и осевом направлениях [4].

Решая совместно уравнения (1) и (2), можно

получить оптимальную температуру сушильного агента в зависимости от влажности зерна в любой точке зерновки, соответствующую наиболее интенсивному процессу сушки, но с сохранением товарных качеств высушиваемого материала [8]. Результаты сравнения теоретических и практических экспериментов приведены в таблице.

Результаты сравнения экспериментальных и теоретических данных показаны на графиках (рис. 1, 2).

Как видно из полученных данных, в процессе сушки есть существенный потенциал к увеличению температуры сушильного агента, что приведет к увеличению скорости сушки и, как следствие, повышению производительности сушильных установок без потери качества высушиваемого материала. Однако реализация такой схемы сушки требует перехода от классической однозонной или, в редких случаях, двухзонной сушки к многозонной. Температура сушильного агента в каждой зоне, равно как и количество зон, определяют индивидуально в зависимости от особенностей зерна. Если же в процессе сушки зерно циркулирует внутри установки, то для реализации такой схемы требуется непрерывное изменение параметров сушильного агента согласно закономерностям, представленным на рис. 1, 2 [6].

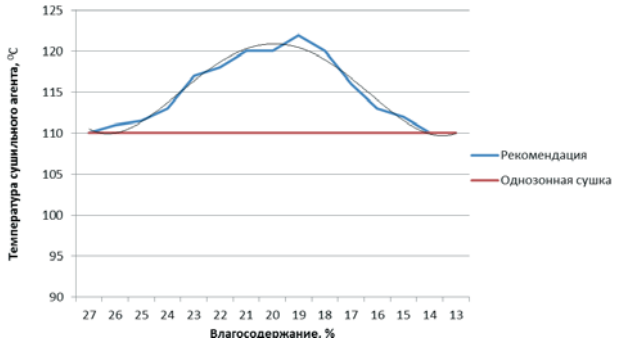

Рис. 1. График рекомендуемой температуры сушильного агента для мягких сортов пшеницы

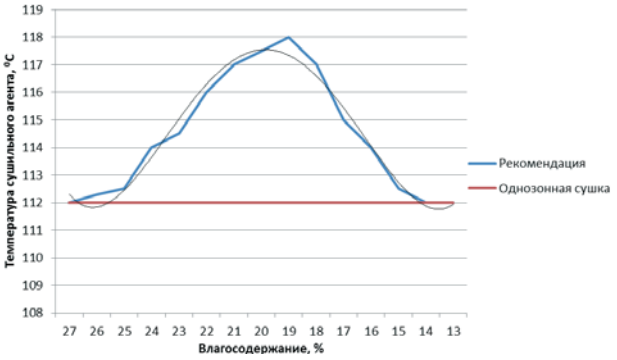

Рис. 2. График рекомендуемой температуры сушильного агента для твердых сортов пшеницы

Заключение. Применение сушки с температурой сушильного агента, близкой к пороговым значениям по условиям недопущения появления микротрещин на поверхности зерна, по предварительным оценкам, позволит повысить производительность зерносушилок на 3–7 % в зависимости от начальных параметров зерна, для достижения которых возможно повышение температуры сушильного агента на 10...12 °С в период постоянной скорости сушки с последующим снижением до исходных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимов А.В.* Пути повышения эффективности процесса переработки зерна на малых предприятиях // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2012. – № 8. – С. 38–43.

2. *Анисимов А.В.* Экспериментальные исследования процессов сушки зерна в СВЧ-поле при подготовке к помолу // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2017. – № 10. – С. 46–50.

3. *Глухарев В.А., Сивицкий Д.В., Попов И.Н.* Математическое моделирование процесса и оптимизация параметров энергетического комплекса для сушки зерновых культур // Научное обозрение. – 2016. – № 16. – С. 56–59.

4. *Егоров Г.А.* Технологические свойства зерна. – М.: Агропромиздат, 1985. – 334 с.

5. *Лыков А.В.* Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

6. *Пермяков В.Н., Масалимов И.Х.* Равномерное

Результаты сравнения теоретических и практических результатов

Температура сушильного агента для мягких сортов пшеницы, °С		Температура сушильного агента для твердых сортов пшеницы, °С	
экспериментальная	оптимальная	экспериментальная	оптимальная
110	110,56	112	111,99
111	110,01	112,3	111,52
111,5	111,37	112,5	112,13
113	113,73	114	113,33
117	116,35	114,5	114,72
118	118,68	116	115,97
120	120,27	117	116,85
120	120,89	117,5	117,22
122	120,44	118	117,02
120	118,97	117	116,28
116	116,72	115	115,11
113	114,07	114	113,73
112	111,56	112,5	112,42
110	109,91	112	111,56
110	109,98	112	111,62

распределение теплового потока в сушильной установке конвейерного типа // Ремонт. Восстановление. Реновация: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. – Уфа, 2011. – С. 52–54.

7. *Сивицкий Д.В., Катруха О.И., Шуленок К.Ю.* Интенсификация процесса сушки зерновых культур // Состояние и перспективы инновационного развития АПК. – 2013. – С. 439–445.

8. *Сивицкий Д.В., Мухин А.И.* Пути повышения интенсивности сушки с сохранением целостности высушиваемого материала // Научный вклад молодых исследователей в сохранение традиций и развитие АПК. – СПб., 2015. – Ч. 1. – С. 342.

9. *Хансаев Г.Ф., Алтухова Т.А., Шуханов С.Н.* Элементы процесса теплообмена при охлаждении зерна в интенсивных аэродинамических полях // Аграрный научный журнал. – 2015. – № 3. – С. 61–63.

10. *Хосни Р.К.* Зерно зернопереработка / пер. с англ.; под общ. ред. Н.П. Черняева. – СПб.: Профессия, 2006. – 336 с.

Глухарев Владимир Алексеевич, *д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительство, теплогазоснабжение и энергообеспечение», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

Сивицкий Дмитрий Валерьевич, *канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительство, теплогазоснабжение и энергообеспечение», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

Попов Иван Николаевич, *канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительство, теплогазоснабжение и энергообеспечение», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

Верзилин Андрей Александрович, *ассистент кафедры «Строительство, теплогазоснабжение и энергообеспечение», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

410056, г. Саратов, ул. Советская, 60.
Тел.: (8452) 74-96-50.

Ключевые слова: *сушка зерна; сушильная установка; тепло; сушильный агент.*

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF ENERGY UNIT DRYING AGENT FOR GRAIN CROPS DRYING

Glucharev Vladimir Alekseevich, *Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Building, Heat, Gas and Energy Supply", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia*

Sivitskiy Dmitriy Velerevich, *Candidate of Technical Science, Associate Professor of the chair "Building, Heat, Gas and Energy Supply", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia*

Popov Ivan Nikolaevich, *Candidate of Technical Science, Associate Professor of the chair "Building, Heat, Gas and Energy Supply", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia*

Verzilin Andrey Aleksandrovich, *Assistant of the chair "Building, Heat, Gas and Energy Supply", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia*

Keywords: *grain crops drying; drying unit; heat; drying medium.*

This article deals with the questions of defining high-limit temperature of drier agent during the drying of grain depending on the features of the drying process, that may let increase the intencity of the process together with saving the grain integrity without the surface cracking as a result of druing. It is the possibility of increasing the temperature of the drier agent for 10...12 °C that was elicited in comparison with existed recommendations in the period of stated drying speed.

УДК 631.371: 631.862.1

АЭРАЦИОННЫЙ БИОРЕАКТОР-ОБЕЗЗАРАЖИВАТЕЛЬ ПОДСТИЛОЧНОГО НАВОЗА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

ГУРЬЯНОВ Дмитрий Валерьевич, *Мичуринский государственный аграрный университет*
ХМЫРОВ Виктор Дмитриевич, *Мичуринский государственный аграрный университет*
ГУРЬЯНОВА Юлия Викторовна, *Мичуринский государственный аграрный университет*
КУДЕНКО Вячеслав Борисович, *Мичуринский государственный аграрный университет*

В статье рассматривается процесс обеззараживания подстилочного навоза в аэрационном биореакторе, представлен цикл биоферментации подстилочного навоза с тремя температурными зонами. Установлен высокий уровень связи между производительностью цепочно-скребкового транспортера и скоростью движения. Разработана конструкция аэрационного биореактора-обеззараживателя непрерывного действия, что необходимо в сельскохозяйственном производстве. Выявлено, что получено органическое удобрение экологически чистое и высокого качества. Срок приготовления органического удобрения из подстилочного навоза в аэраторе-обеззараживателе 5 сут.

Введение. Подстилочный навоз крупного рогатого скота, свиней, овец и помет птицы – основной компонент для производства экологически чистых органических удобрений. Внесение в почву свежего навоза приводит к большим негативным последствиям: загрязняет окружающую среду, почву, водоемы, атмосферу болезнетворными бактериями и гельминтами. В настоящее время разработаны технологии и технические средства для переработки сельскохозяйственных отходов в органические удобрения, такие как аэрационные цеха и биореакторы, но они требуют больших капитальных затрат при загрузке исходного сырья и выгрузке готового органического удобрения. По-