

Научная статья
УДК 631.365.22

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА И ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА
 НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛКЕ
 АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА**

¹**Виктор Николаевич Ожерельев, ¹Алексей Иванович Купреенко,**

¹**Хафиз Мубариз-оглы Исаев, ²Татьяна Николаевна Толстухова,**

¹**Олег Алексеевич Купреенко, ²Станислав Михайлович Михайличенко**

¹**ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия**

²**ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия**

Аннотация. В Брянском ГАУ проводятся исследования по использованию для сушки зерна перспективного вида сушильных установок - сушилки аэродинамического нагрева. Как показывает практика на продолжительность сушки зерна наибольшее влияние влажность зерна, температура сушильного агента, расход сушильного агента. Был реализован факторный эксперимент типа 3² с варьированием факторов на трех уровнях: влажность зерна $\omega = 16; 18; 20\%$; температура сушильного агента $T = 50; 55; 60^{\circ}\text{C}$. В качестве отклика определялась продолжительность сушки зерна до влажности 14 %. Цель исследования: установление зависимости продолжительности процесса сушки зерна от температуры сушильного агента и влажности зерна. Для уменьшения трудоемкости экспериментальных исследований, уменьшения массы высушиваемого и, соответственно, увлажняемого зерна часть подводящих и отводящих коробов сушильной шахты было заглушено. Оставлен только ряд подводящих коробов и два ряда отводящих. Для достижения требуемой влажности зерна, подвергающегося сушке, производили его увлажнение в количестве 200 кг. Температуру сушильного агента определяли с помощью метеометра МЭС-200. Влажность и температуру зерна определяли влагомером Wile-65. В результате обработки результатов эксперимента в программе Statistica 13 получено уравнение регрессии. С ростом температуры сушильного агента и понижением влажности зерна продолжительность сушки снижается. При этом в продолжительность сушки входит время прогрева самой сушилки, которое составляет порядка 20 мин до набора температуры сушильного агента в пределах 45°C. Таким образом, полученное в результате экспериментальных исследований сушилки аэродинамического нагрева уравнение позволяет прогнозировать продолжительность процесса сушки зерна в зависимости от его влажности и температуры сушильного агента. При этом наибольшее влияние на продолжительность процесса сушки оказывает влажность зерна в пределах допустимых значений температуры сушильного агента.

Ключевые слова: аэродинамический нагрев, температура сушильного агента, влажность зерна, продолжительность сушки зерна, планирование эксперимента.

Для цитирования: Влияние температуры сушильного агента и влажности зерна на продолжительность процесса сушки в сушилке аэродинамического нагрева / В.Н. Ожерельев, А.И. Купреенко, Х.М. Исаев и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 6 (112). С. 61-65.

Original article

**INFLUENCE OF DRYING AGENT TEMPERATURE AND GRAIN MOISTURE CONTENTS
 ON DURATION OF DRYING PROCESS IN AERODYNAMIC HEATING DRYER**

¹**Victor N. Ozherel'yev, ¹Alexei I. Kupreenko, ¹Hafiz M. Isaev, ²Tat'yana N. Tolstoukhova,**

¹**Oleg A. Kupreenko, ²Stanislav M. Mikhailichenko**

¹**Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Kokino, Russia**

²**Russian State Agrarian University- Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia**

Abstract. The researches on the use of a promising type of drying units - an aerodynamic heating dryer, for drying grain are being conducted at Bryansk State Agrarian University. As practice shows, the duration of grain drying is most affected by the grain moisture content, the temperature of the drying agent, and the flow rate of the drying agent. A factorial experiment of type 3² was carried out with the factors varying at three levels: grain moisture $\omega = 16; 18; 20\%$; drying agent temperature $T = 50; 55; 60^{\circ}\text{C}$. The response was determined by the duration of grain drying to a moisture contents of 14%. The purpose of the study was to determine the dependence of grain drying process duration on the drying agent temperature and grain moisture. To reduce the labour intensity of experimental researches, to decrease the mass of the dried material and, accordingly, moistened grain, a part of the supply and discharge boxes of the drying shaft was blocked. Only a row of

supply boxes and two rows of discharge boxes were left. To achieve the required moisture contents of the grain being dried, it was moistened in an amount of 200 kg. The temperature of the drying agent was determined by using the MES-200 meteorometer. The grain moisture and temperature were determined by using a Wile-65 moisture meter. The regression equation was obtained by processing the experimental results using Statistica 13. As the drying agent temperature increases and the grain moisture decreases, the drying time decreases. The drying time includes the time required to warm up the dryer, which takes approximately 20 minutes to reach a drying agent temperature of 45°C. Thus, the equation obtained as a result of experiments of the aerodynamic heating dryer allows us to predict the duration of the grain drying process depending on its moisture contents and the temperature of the drying agent. At the same time, the moisture contents of the grain has the greatest impact on the duration of the drying process within the permissible temperature range of the drying agent.

Keywords: aerodynamic heating, drying agent temperature, grain moisture contents, grain drying duration, experimental planning.

For citation: Influence of Drying Agent Temperature and Grain Moisture Contents on Duration of Drying Process in Aerodynamic Heating Dryer / Ozherel'yev V.N., Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., et al. // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2025. No. 6 (112). pp. 61-65.

Введение. В Брянском ГАУ проводятся исследования по использованию для сушки зерна перспективного вида сушильных установок - сушилки аэродинамического нагрева [1-6].

Как показывает практика на продолжительность сушки зерна наибольшее влияние оказывают следующие факторы [7, 8]:

- влажность зерна ω ;
- температура сушильного агента T ;
- расход сушильного агента L .

В модульной сушилке Брянского ГАУ для регулирования расхода сушильного агента можно использовать заслонку смотрового окна рабочей камеры ротора-нагревателя. Однако измерение скорости воздушного потока в подающем патрубке диффузора сушильной шахты показало, что при изменении положения заслонки не наблюдалось адекватного изменения скорости воздушного потока.

Это связано с тем, что в камере ротора-нагревателя происходит вихреобразное движение сушильного агента и вследствие очень короткой длины подающего патрубка такое движение сохраняется и в нем. Вследствие этого обеспечить достоверно заданный расход сушильного агента не представлялось возможным. Поэтому все испытания сушилки проводились при полностью открытой заслонке и максимальной подаче сушильного агента.

Определять подачу сушильного агента по количеству отводимого из шахты сушильного агента также было не корректно из-за прохода в сушильную шахту части воздушного потока из пневмотранспортера через его приемное устройство, а также возможного подсасывания атмосферного воздуха через верх шахты в отводящие короба из-за замыкания их на всасывающий канал ротора-нагревателя через внешний контур рециркуляции сушильного агента.

Кроме этого наблюдался также в загрузочном зерновом бункере шахты при ее полной загрузке некоторый выход сушильного агента вдоль центральной части стенки конфузора, которая заглушает торцы подающих коробов. Это было видно по небольшому столбику взвешенных примесей зерновой массы.

Таким образом, в результате планируется реализация факторного эксперимента типа 3^2 с варьированием факторов на трех уровнях:

- влажность зерна $\omega = 16; 18; 20 \%$;
- температура сушильного агента $T = 50; 55; 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В качестве отклика будет определяться продолжительность сушки зерна до влажности 14 %.

Цель исследования: установление зависимости продолжительности процесса сушки зерна от температуры сушильного агента и влажности зерна.

Материалы и методы. Для уменьшения трудоемкости экспериментальных исследований, уменьшения массы высушиваемого и, соответственно, увлажняемого зерна часть подводящих и отводящих коробов сушильной шахты было заглушено (рис. 1). Оставлен только ряд подводящих коробов и два ряда отводящих.



Рисунок 1 - Вид шахты со стороны подводящих (а) и отводящих (б) коробов

Для достижения требуемой влажности зерна, подвергающегося сушке, по методике [Атаназевич, В.И. Сушка зерна. М.: ДеЛи принт. 2007. 480 с] производили его увлажнение в количестве 200 кг.

Увлажнение зерна производили послойно в ванне с помощью электрического опрыскивателя при перемешивании всей массы зерна вручную (рис. 2).



Рисунок 2 - Ванна с зерном в процессе увлажнения

Количество воды M_B , вносимой в массу зерна, рассчитывали по формуле:

$$M_B = M_3 \frac{\omega_k - \omega_h}{100 - \omega_k}, \text{ кг}, \quad (1)$$

где M_3 - масса увлажняемого зерна, кг;

ω_k , ω_h - конечная и начальная влажность зерна, %.

Продолжительность выдержки увлажненного зерна составляла 3 дня для обеспечения равномерного распределения влаги по массе зерна. В течение дня два-три раза производилось перемешивание зерна. Температуру сушильного агента определяли с помощью метеометра МЭС-200. Влажность и температуру зерна определяли влагомером Wile -65.

Полученные результаты обрабатывались корреляционно-регрессионным анализом в программе STATISTICA 13 с получением уравнения регрессии, проверкой его на адекватность по критерию Фишера, а достоверности коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента

Результаты и обсуждение. Реализация матрицы планирования эксперимента типа 3^2 в физических величинах факторов имеет вид таблицы 1.

Таблица 1 - Результаты реализации матрицы планирования эксперимента типа 3^2

№ опыта	Факторы		Отклик Y
	X ₁	X ₂	
	влажность зерна ω , %	температура сушильного агента T , °C	
1	16	50	60
2	16	55	48
3	16	60	40
4	18	50	135
5	18	55	120
6	18	60	90
7	20	50	150
8	20	55	135
9	20	60	110

В результате обработки результатов эксперимента в программе Statistica 13 получено уравнение регрессии:

$$t = -79,33 + 20,58\omega - 3,5T. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции $R = 0,945$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,893$. Расчетное значение критерия Фишера $F_p = 25,145 > F_r = 5,14$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и уровне значимости F - критерия $p = 0,001$, что свидетельствует об адекватности уравнения регрессии.

Анализ зависимости (2) показывает, что преобладающее влияние на продолжительность сушки оказывает влажность зерна (рис. 3).

Двумерное сечение поверхности отклика представлено на рис. 4.

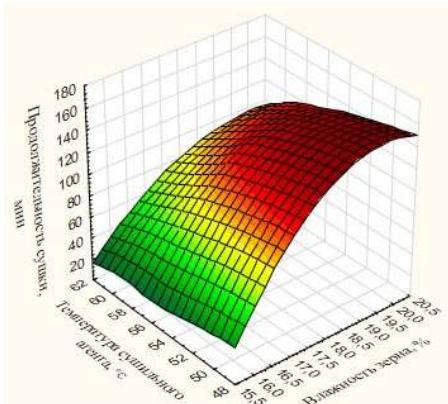


Рисунок 3 - Зависимость продолжительности сушки зерна от температуры сушильного агента и влажности зерна

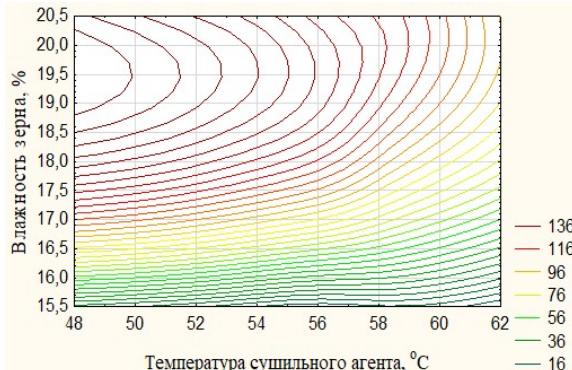


Рисунок 4 - Двумерное сечение поверхности отклика зависимости продолжительности сушки зерна от температуры сушильного агента и влажности зерна

С ростом температуры сушильного агента и понижением влажности зерна продолжительность сушки снижается. При этом в продолжительность сушки входит время прогрева самой сушилки, которое составляет порядка 20 мин до набора температуры сушильного агента в пределах 45°C.

Выводы. Таким образом, полученное в результате экспериментальных исследований сушилки аэродинамического нагрева уравнение (2) позволяет прогнозировать продолжительность процесса сушки зерна в зависимости от его влажности и температуры сушильного агента. При этом наибольшее влияние на продолжительность процесса сушки оказывает влажность зерна в пределах допустимых значений температуры сушильного агента.

Список источников

1. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Результаты испытания сушилки аэродинамического подогрева с комбинированным теплообменником // Инновации и технологический прорыв в АПК: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2. Брянск, 2020. С. 211-214.
2. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Сушилки с аэродинамическим нагревом воздуха // Сельский механизатор. 2021. № 11. С. 16-17.
3. Сушилка аэродинамического нагрева модульного типа / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, С.М. Михайличенко и др. // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. тр. Брянск, 2022. С. 218-222.
4. Результаты испытания опытного образца зерносушилки с генератором теплоты аэродинамического типа / В.Н. Ожерельев, Х.М. Исаев, Т.В. Панова и др. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 1 (99). С. 129-136.
5. Сравнительная эффективность использования модульной сушилки аэродинамического нагрева / В.Н. Ожерельев, А.И. Купреенко, Х.М.О. Исаев и др. // Современные тенденции развития аграрной науки: сб. науч. тр. II междунар. науч.-практ. конф. Брянск, 2023. С. 199-203.
6. Купреенко А.И., Исаев, Х.М., Исаев, С.Х. Снижение энергоемкости сушилки аэродинамического нагрева // Тракторы и сельхозмашини. 2021. № 1. С. 81-88.
7. Байрамов Р.З. Вендин С.В., Саенко Ю.В. Конвейерная сушилка пророщенного зерна с применением конвективного и инфракрасного нагрева // Инновации в АПК: проблемы и перспективы: Майский, 2023. № 1. С. 19-26.
8. Сушка зерна в режиме пневмотранспорта / А.В. Волженцев, Р.А. Булавинцев, А.В. Козлов и др. // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 1 (30). С. 99-103.

Информация об авторах:

В.Н. Ожерельев - доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры технических систем в агробизнесе, природооустройстве и дорожном строительстве ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, vicoz@bk.ru.

А.И. Купреенко - доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Х.М. Исаев - кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Т.Н. Толстоухова - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации сельского хозяйства ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.

О.А. Купреенко - аспирант кафедры технических систем в агробизнесе, природооустройстве и дорожном строительстве ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

С.М. Михайличенко - кандидат технических наук, доцент кафедры механизации сельского хозяйства ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.

Information about the authors:

V.N. Ozherel'yev - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Systems in Agrobusiness, Environmental Management and Road Construction, Bryansk State Agrarian University, vicoz@bk.ru.

A.I. Kupreenko - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Technological Equipment of Animal Husbandry and Processing Industries, Bryansk State Agrarian University.

H.M. Isaev - Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technological Equipment Animal Husbandry and Processing Industries of the Bryansk State Agrarian University.

T.N. Tolstoukhova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Agricultural Mechanization of Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev.

O.A. Kupreenko - Post-graduate Student of the Department of Technical Systems in Agrobusiness, Environmental Management and Road Construction of the Bryansk State Agrarian University.

S.M. Mikhaylichenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Agricultural Mechanization of Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17.10.2025, одобрена после рецензирования 13.11.2025, принята к публикации 27.11.2025.

The article was submitted 17.10.2025, approved after reviewing 13.11.2025, accepted for publication 27.11.2025.

© Ожерельев В.Н., Купреенко А.И., Исаев Х.М., Толстоухова Т.Н., Купреенко О.А., Михайличенко С.М.