

Н. В. РУСИНА

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье обоснована необходимость применения системного подхода к обеспечению безопасности в процессе сушки зерна на зерносушильных комплексах и обеспечение качества зерна, а также эффективности процесса сушки. Разработана математическая модель процесса сушки, в виде системы дифференциальных уравнений, которая описывает динамику изменения температуры в процессе сушки зерна.

Ключевые слова: системный подход, системный анализ, цифровые технологии, зерносушильный комплекс, сушка зерна, математическое моделирование

Введение

Интенсивное развитие общества наряду с техническими и технологическими возможностями требует постоянного решения сложных задач в различных сферах жизни человека и необходима уверенность в том, что условия труда безопасны, а риски возникновения непредвиденных и неконтролируемых ситуаций минимальны. Так, в процессе сушки зерновых на зерносушильном комплексе имеется высокий риск возникновения аварийных ситуаций. Соблюдение температурного режима сушки важно для сохранения продовольственных и семенных качеств зерновых [1, с. 7].

Успешное решение проблемы повышения безопасности на производстве и сведение рисков опасных ситуаций к минимуму возможно с помощью системного подхода: любой объект можно представить множеством элементов (состав системы), а процесс – множеством связей или отношений, которые описывают структуру системы. При этом наличие связей превращает совокупность объектов в систему, и представляется возможность анализировать и контролировать

как каждый элемент в отдельности, так и систему в целом [2].

Цель данной работы – обоснование необходимости применения системного подхода к управлению зерносушильными комплексами и построение математической модели процесса сушки зерна. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: определить основные риски и нарушения, возникающие в процессе сушки зерновых; представить математическую модель процесса сушки зерна, описывающую изменение температуры слоев зерна, которую можно использовать для задания алгоритмов работы технических средств, обеспечивающих производственную безопасность и качество готового продукта.

Основная часть

Основные нарушения при сушке зерна можно разделить на следующие категории: технологические, механические, организационные. В таблице 1 представлена более подробная классификация нарушений и их последствий.

Таблица 1. Классификация, описание и последствия нарушений

Нарушение	Описание нарушения	Последствие нарушения
Превышение температуры агента сушки	Использование слишком горячего теплоносителя с целью ускорить процесс сушки	Тепловая денатурация белков, появление трещин на оболочке зерна, снижение всхожести семян
Перегрев зерна	Превышение допустимой температуры нагрева зерна	Зерно может полностью потерять пищевую ценность
Неравномерный нагрев	Возникает из-за конструктивных недостатков сушилки	В одной партии часть зерна остается сырой, а часть – пересушенной и поврежденной
Стремительный съем влаги за один подход	Попытка высушить очень влажное зерно за один цикл	Резкое снижение пропускной способности сушилки и растрескивание зерна
Конденсация влаги при охлаждении	Некорректный режим охлаждения после сушки	Повторное увлажнение уже высушенного зерна
Засорение и пылеобразование	Интенсивное трение приводит к истиранию поверхностей и образованию мелкой зерновой пыли	Высокий риск возгорания и взрыва пылевоздушной смеси, пожар в шахте, поломка оборудования, снижение качества сушки зерна

Продолжение таблицы 1

Нарушение	Описание нарушения	Последствие нарушения
Неравномерная загрузка	Зерно подается слоями с разной влажностью	Прорыв горячего воздуха мимо зерна, риск возгорания, наличие на выходе зерна различного по влажности
Нарушения при остановке зерносушилки	Остановка процесса сушки без выгрузки зерна	Зерно перегревается

Автоматические системы управления позволяют контролировать параметры сушки и мгновенно реагировать на отклонения. Использование датчиков температуры позволяет удаленно отслеживать режимы нагрева.

Системный подход для обеспечения производственной безопасности на зерносушильном комплексе предусматривает комплексное управление мерами обеспечения безопасности. Сопутствующие процессы и их краткое описание приведены в таблице 2.

Таблица 2. Интегрированное управление процессом сушки на зерносушильном комплексе

Процесс	Описание процесса
Автоматический контроль	Позволяет отслеживать все технологические параметры и информировать оператора об их состоянии
Дистанционное управление	Дистанционное управление всем технологическим оборудованием (включение, отключение, регулирование технологических параметров) осуществляется оператором посредством компьютерной системы или панели оператора
Реализация алгоритмов	Система автоматически выполняет задачи управления, контроля и сигнализации в соответствии с заданными параметрами (температура, влажность, время), оповещая о состоянии технологического процесса и авариях
Сигнализация и оповещение	Система предназначена для информирования персонала о возникновении аварийных ситуаций и отклонений от установленных (заданных) параметров
Архивирование данных	Система осуществляет запись и хранение всей информации, относящейся к динамике процесса сушки

Обобщенно любую систему можно представить следующими компонентами: вход, управляющий модуль, управляемый модуль, выход, обратная связь [3].

Входным управляемым параметром в процессе безопасной сушки зерновых является температура нагрева зерна в зерносушильном комплексе. Информация о состоянии данных параметров с помощью датчиков передается в систему управления, контроля сигнализации и архивации. Система управления на основе определенных алгоритмов анализирует информацию и формирует выходные сигналы для управления технологическим оборудованием либо устройствами сигнализации и контроля.

Техническая реализация алгоритмов управления требует использования математической модели системы. Математическая модель процесса сушки зерна может быть представлена в виде системы уравнений, которые устанавливают связь между выходными и входными данными. В описании данной математической модели в качестве оценочного показателя принята температура нагрева зерна [4].

Когда зерно находится в емкости, предназначенной для сушки, температура различна в разных частях объема. Следовательно, объект можно интерпретировать как систему с распределенными пара-

метрами. Для упрощения вычислений такую систему целесообразно разделить на элементарные части или слои. В процессе сушки тепло распространяется неравномерно и в различных слоях имеет разную температуру. Исходя из того, что поведение данной системы основывается на поведении системы в прошлом при каждом последующем шаге, для ее моделирования используем дифференциальные уравнения. Для упрощения математической модели представим разбиение всего объема зерна на два слоя 1 и 2, с температурой T_1 и T_2 соответственно, а также имеется нагреватель с температурой T_n и среда – с температурой T_{cp} .

Данную модель можно представить в виде графа:

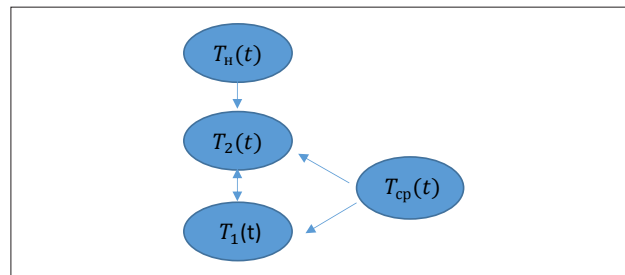


Рисунок 1. Граф зависимости температуры нагрева зерна от времени

Из рисунка 1 видно, что температура нагревателя влияет на температуру слоя 2, которая в свою очередь влияет на температуру слоя 1, и это влияние взаимнообратное, а также температура среды влияет на температуру каждого слоя.

У разных слоев зерна разная температура, которая влияет на изменение температуры во всем объеме зерна в зерносушильной шахте. Запишем математическую модель с учетом коэффициента теплопередачи k , который характеризует интенсивность теплообмена между элементами системы в процессе сушки.

Изменение температуры с учетом k в первом слое будет иметь вид:

$$\frac{dT_1}{dt} = k_{21}(T_2 - T_1) + k_{cp1}(T_{cp} - T_1),$$

где k_{21} и k_{cp1} – коэффициенты теплопередачи, характеризующие перенос теплоты от слоя 2 к слою 1 и от среды к слою 1 соответственно.

Изменение температуры во втором слое будет иметь вид:

$$\frac{dT_2}{dt} = k_{н2}(T_{н} - T_2) + k_{12}(T_1 - T_2) + k_{cp2}(T_{cp} - T_2),$$

где $k_{н2}$, k_{12} , k_{cp2} – коэффициенты теплопередачи, характеризующие перенос теплоты от нагревателя к слою 2, от слоя 1 к слою 2 и от среды к слою 2 соответственно, $T_{н}$, T_{cp} , T_1 , T_2 – температура нагревателя, среды, слоя 1 и слоя 2 соответственно.

Процесс сушки зерна зависит от вида сельскохозяйственной культуры, типа зерносушильной установки и занимает несколько часов. В пределах суточной температуры окружающей среды можно допустить, что $T_{cp} = const$ на интервале времени, соответствующему одному циклу сушки. Температура нагревателя контролируется оператором, может меняться в режиме реального времени, задается управляющим алгоритмом и не должна превышать допустимую температурную норму для каждого вида сырья. В то же время $T_{н}$ можно считать постоянной в каждом конкретном случае.

Тогда $\frac{dT_{н}}{dt} = 0$ и $\frac{dT_{cp}}{dt} = 0$, так как $T_{н} = const$, $T_{cp} = const$.

Таким образом, вся система уравнений имеет вид:

$$\frac{dT_1}{dt} = k_{21}(T_2 - T_1) + k_{cp1}(T_{cp} - T_1);$$

$$\frac{dT_2}{dt} = k_{н2}(T_{н} - T_2) + k_{12}(T_1 - T_2) + k_{cp2}(T_{cp} - T_2);$$

$$\frac{dT_{н}}{dt} = 0; \frac{dT_{cp}}{dt} = 0.$$

Итак, получена система обыкновенных дифференциальных уравнений от одной независимой переменной времени (t). Количество тепла, которое поступает от слоя 1 к слою 2, равно количеству тепла, которое принимает слой 2 из слоя 1: $k_{12} = k_{21}$.

Для решения системы дифференциальных уравнений необходимо знать коэффициенты теплопередачи и начальное состояние системы, т. е. температуру каждого выделенного слоя, а также температуру нагревателя и среды в начальный момент времени.

Таким образом, зная, какие показатели необходимо иметь на выходе, а это зависит от того, для чего предназначено сырье (продовольствие, фураж, семенной материал), и динамику процесса сушки, согласно математическому описанию, можно задать алгоритм управления, реализуемый устройством управления, обеспечивающий точное поддержание параметров сушки. Возможность контролировать и, при необходимости, влиять на такой параметр, как температура сырья в процессе сушки, позволит оптимизировать работу зерносушилки, обеспечив ее максимальную производительность [5]. Такой подход исключит риск пересушки зерна и минимизирует угрозу возникновения аварийной ситуации в системе.

Заключение

На основании системного подхода анализа условий безопасного обеспечения процесса сушки зерновых на зерносушильном комплексе выявлены следующие необходимые обязательные меры: исправная работа оборудования; контроль технологических параметров; оперативная передача информации для реагирования персонала; обеспечение технологической и аварийной сигнализации; обучение действиям персонала в случае аварийной сигнализации. Техническая реализация безопасного процесса сушки зерновых требует алгоритмов управления на базе математической модели системы. Описана математическая модель процесса сушки зерна в зерносушилке, которая способна обеспечить оптимизацию процесса сушки, что позволяет снизить риски аварийной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шило, И. Н. Современное оборудование и машины для послеуборочной обработки зерна : справочник / И. Н. Шило, Е. И. Михайловский. Минск : БГАТУ, 2011. 508 с. URL: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/6699> (дата обращения: 17.06.2026).
2. Белов, П. Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование : в 3 ч. / П. Г. Белов. М.: Юрайт, 2022. Ч. 1. 211 с.
3. Системный подход в исследовании и создании пористых проницаемых материалов / П. А. Витязь, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич, А. М. Тарайкович // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе : материалы 7-го Международного симпозиума (Минск, 19–20 октября 2023 г.) / редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2023. С. 26–35.

4. Системный подход в исследовании производственной безопасности / Л. П. Пилинович, А. Г. Бунас, Н. В. Русина // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2025. № 1. С. 11–22. DOI: 10.54422/1994-439X.2025.1-57.11-22.

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

REFERENCES

1. Shilo I.N., Mikhaylovskiy Ye.I. *Sovremennoye oborudovaniye i mashiny dlya posleuborochnoy obrabotki zerna: spravochnik [Modern Equipment and Machines for Post-Harvest Grain Processing: Handbook]*. Minsk: BGATU; 2011. 508 p. Available at: <https://rep.bsatu.by/handle/doc/6699> (accessed 17 June 2026) (in Russian).

2. Belov P.G. *Upravleniye riskami, sistemnyy analiz i modelirovaniye [Risk Management, Systems Analysis and Modeling]*. Vol. 1. Moscow: Yurait; 2022. 211 p. (in Russian).

3. Vityaz' P.A., Pilinevich L.P., Savich V.V., Taraykovich A.M. Sistemnyi podkhod v issledovanii i sozdanii poristyykh pronitsayemykh materialov [A systematic approach to the study and creation of porous permeable materials]. *Porous Permeable Materials: Technologies and Products Thereof: Proceedings of the 7th International Symposium (Minsk, October 19–20, 2023)*. Minsk: Belaruskaya Navuka; 2023. p. 26–35. (in Russian).

4. Pilinevich L.P., Bunas A.G., Rusina N.V. Systematic approach to industrial safety research. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*. 2025;1:11–22 (in Russian). <https://doi.org/10.54422/1994-439X.2025.1-57.11-22>.

5. Kurdyumov V.I., Pavlushin A.A., Karpenko G.V., Sutyagin S.A. *Teplovaya obrabotka zerna v ustanovkakh kontaktnogo tipa [Heat Treatment of Grain in Contact Plants]*. Ulyanovsk: UGSKHA im. P.A. Stolypina; 2013. 290 p. (in Russian).

N. V. RUSINA

INTEGRATION OF A SYSTEMIC APPROACH TO SOLVING PROBLEMS OF THE GRAIN DRYING PROCESS

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. *In this article, the necessity of applying a systematic approach to ensuring safety in the grain drying process at grain drying complexes and ensuring grain quality, as well as the efficiency of the drying process, is justified. An analytical mathematical model of the drying process has been developed in the form of a system of differential equations that describes the dynamics of temperature change in the grain drying process.*

Keywords: *systematic approach, system analysis, digital technologies grain drying complex, grain drying, mathematical modeling*

Русина Наталья Владимировна

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь.

Старший преподаватель кафедры «Экономическая информатика» БГУИР, аспирантка. Область научных интересов: теория системного анализа и принятия решения, системный анализ, системный подход.

Natalia Vladimirovna Rusina

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk, Republic of Belarus.

Senior Lecturer at the Department of Economic Informatics BSUIR, Postgraduate Student. Research interests: theory of systems analysis and decision-making, systems analysis, system approach.

E-mail: n.rusina@bsuir.by