

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЗЕРНА**Н. В. РУСИНА**

*«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220013*

(Поступила в редакцию 10.04.2026)

Интенсивное развитие общества наряду с техническими и технологическими возможностями требует постоянного решения сложных задач в различных сферах жизни человека. Вместе с тем необходима уверенность в том, что условия труда человека безопасны и риски возникновения непредвиденных и неконтролируемых ситуаций минимальны. Так, в процессе сушки зерновых на зерносушильном комплексе имеется высокий риск возникновения аварийных ситуаций, не допустить которые должны современные технические средства на основе анализа множества входных данных. Сушка зерна – критический этап послеуборочной обработки, сопровождающийся серьезными рисками промышленной безопасности. Грубое нарушение температурного режима при сушке зерновых может привести к самовозгоранию или пожару.

Успешное решение проблемы повышения безопасности на любом производстве и сведение рисков опасных ситуаций к минимуму возможно с помощью использования системного подхода, который в настоящее время уже нашёл широкое применение практически во всех сферах деятельности человека. Определение системного подхода даёт понимание того, что любой объект можно представить множеством элементов или компонентов, что представляет состав системы, а процесс – множеством связей или отношений, которые описывают структуру системы. При этом наличие связей превращает совокупность объектов в систему. Таким образом, представляется возможность анализировать и контролировать каждый элемент в отдельности, так и систему в целом.

В данной статье проведено исследование условий безопасной работы зерносушильного комплекса на основе системного подхода. Предложена математическая модель процесса сушки зерна, которая позволяет изучить и предсказать динамику процесса, отображая взаимозависимость между входными и выходными параметрами. Использование модели даёт возможность анализировать динамику процесса сушки зерна, не прибегая к материальным затратам.

Ключевые слова: *системный подход, системный анализ, зерносушильный комплекс, сушка зерна.*

The rapid development of society, coupled with technical and technological advances, requires constant solutions to complex problems in various areas of human life. At the same time, it is essential to ensure that human working conditions are safe and the risks of unexpected and uncontrolled situations are minimal. For example, during the grain drying process at a grain drying complex, there is a high risk of accidents, which must be prevented by modern technical means based on the analysis of multiple input data. Grain drying is a critical stage of post-harvest processing, accompanied by serious industrial safety risks. A serious violation of the temperature regime during grain drying can lead to spontaneous combustion or fire.

Successful solutions to the problem of improving safety in any production facility and minimizing the risk of hazardous situations are possible through the use of a systems approach, which is now widely used in virtually all areas of human activity. The definition of a systems approach implies that any object can be represented by a set of elements or components, representing the composition of the system, and a process by a set of connections or relationships that describe the system's structure. The presence of connections transforms a set of objects into a system. This makes it possible to analyze and control each element individually, as well as the system as a whole.

This article examines the safe operating conditions of a grain drying complex using a systems approach. A mathematical model of the grain drying process is proposed, allowing for the study and prediction of process dynamics, depicting the interdependence between input and output parameters. Using this model, one can analyze the dynamics of the grain drying process without resorting to material costs.

Key words: *systems approach, systems analysis, grain drying complex, grain drying.*

Введение

В процессе сушки важно обеспечить требуемую влажность зерна, которая гарантирует его продолжительное хранение. Для большинства зерновых культур это 14 % [1, с. 26]. Соблюдение температурных режимов сушки также важно для сохранения продовольственных и особенно семенных качеств зерновых. Важно обеспечить устойчивую производственную и технологическую безопасность на зерносушильном комплексе, что, несомненно, приведёт к улучшению качества зерна и уменьшению энергетических затрат. Причём важно иметь не только максимальное количество продукции, собранной со всей площади посева зерновых, но и не потерять возможность сохранить урожай во время послеуборочной обработки и при последующем хранении [2, с. 7].

Развитие и совершенствование технологического аспекта любого производства направлено на решение комплексной задачи, которая могла бы охватывать весь цикл производства, учитывая его промежуточные составляющие. Концепция решения таких задач лежит в основе системного анализа, где есть возможность учитывать множество разнородных фактов, выделить те из них, которые имеют наиболее сильное воздействие на систему в целом, а также находить оптимальные способы влияния на них. Сама же система может быть представлена как комплекс элементов, направленных на решение общих задач безопасности производства и повышения экономической рентабельности.

Если в процессе сушки зерновых не контролировать температуру нагрева зерновых и не реагировать на ее превышение, то это может стать причиной пожара на зерносушильном комплексе. Таким

образом, зерно в процессе сушки может быть не только уничтожено из-за возгорания, но и повреждено посредством воздействия температуры, превышающей допустимую, что делает зерно непригодным для последующего использования (продовольствие, фураж, посевной материал) [3].

Цель данной работы – обосновать необходимость применения системного подхода к управлению зерносушильными комплексами. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: определить основные риски и нарушения, возникающие в процессе сушки зерновых, описать компоненты системного подхода, такие как анализ рисков, автоматизация, обучение персонала, мониторинг и показать, как они повышают уровень безопасности, а также разработать математическую модель процесса сушки зерна, которую можно использовать для задания алгоритмов работы технических средств, обеспечивающих производственную безопасность.

Основная часть

Проанализируем возможные риски и типичные нарушения, возникающие в процессе сушки зерна на зерносушильном комплексе. Главные опасности при сушке зерна связаны с возгоранием и взрывом. Зерновая пыль и примеси обладают горючими свойствами и могут образовывать взрывоопасные смеси. Основные нарушения при сушке зерна можно разделить на следующие категории: технологические (нарушения режимов сушки), механические (повреждение зерна), организационные (ошибки эксплуатации зерносушильного комплекса). В табл. 1 представлена более подробная классификация нарушений и их последствий.

Таблица 1. Классификация, описание и последствия нарушений

Нарушение	Описание нарушения	Последствие нарушения
1 Превышение температуры агента сушки	Использование слишком горячего теплоносителя с целью ускорить процесс сушки	Тепловая денатурация белков, появление трещин на оболочке зерна, снижение всхожести семян
2 Перегрев зерна	Превышение максимально допустимой температуры нагрева зерна	Зерно может полностью потерять пищевую ценность
3 Неравномерный нагрев	Возникает из-за конструктивных недостатков сушилки или неправильной подачи теплоносителя	В одной партии часть зерна остаётся сырой, а часть – пересушенной и повреждённой
4 Слишком стремительный съём влаги за один подход	Попытка высушить очень влажное зерно за один цикл, игнорируя рециркуляцию	Резкое снижение пропускной способности сушилки и растрескивание зерна
5 Конденсация влаги при охлаждении	Некорректный режим охлаждения после сушки, при котором на остывающем зерне выступает конденсат	Повторное увлажнение уже высушенного зерна
6 Повреждение зерна	Удары зерна о рабочие поверхности, падение с высоты, трение о движущиеся части	Микротравмы зерна, сколы
7 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
8 Неравномерная загрузка или неполное заполнение зерносушилки	Зерно подаётся слоями с разной влажностью	Прорыв горячего воздуха мимо зерна, риск возгорания, наличие на выходе зерна различного по влажности
9 Нарушения при остановке зерносушилки	Остановка процесса сушки без выгрузки зерна	Зерно перегревается
10 Загрязнение оборудования	Нерегулярная чистка сушилки от пыли, примесей	Снижение эффективности теплообмена, коррозия оборудования, ремонт
11 Подача запыленного воздуха на горелку	Использование забортного воздуха с высокой концентрацией пыли	Образование искр в зоне сушки, возгорание
12 Отсутствие аварийного сброса зерна	В оборудовании отсутствует аварийный сброс горящего зерна	При пожаре невозможно быстро и эффективно локализовать очаг возгорания
13 Игнорирование энергонезависимости	Отсутствие резервного генератора	Внезапное отключение электроэнергии останавливает вентиляторы зерносушилки

Анализ рисков при сушке зерна. На этапе проектирования и эксплуатации проводится идентификация опасностей и их количественная/качественная оценка. Это позволяет разработать матрицы или карты опасности и определить критические узлы процесса, а также предусмотреть установку датчиков для контроля температуры, влажности и давления. Вместе с тем необходимы регулярные проверки герметичности и исправности топок.

Автоматизация и мониторинг процесса сушки зерна. Автоматические системы управления (АСУ) позволяют постоянно контролировать параметры сушки и мгновенно реагировать на отклонения. Для постоянного контроля параметров сушки (температуры, влажности выходящего воздуха, скорости воздушного потока) существует система датчиков контроля и сигнализации: при превышении заданной температуры зернового слоя автоматическое срабатывает аварийная сигнализация, а при бездействии персонала – отключается подача топлива и останавливается процесс.

Использование датчиков температуры в шахтных сушилках позволяет удалённо отслеживать режимы нагрева. Анализируя данные, поступающие с датчиков, АСУ может автоматически корректировать подачу теплоносителя, предотвращая перегрев зерна, или сигнализировать аварийным службам о некорректном режиме работы. В целом автоматизация управления процессом сушки снижает долю человеческого фактора и минимизирует ошибки.

Обучение и аттестация персонала, вовлечённого в производственный процесс сушки зерна. Квалификация операторов и обслуживающего персонала является важным фактором безопасности. Систематическое обучение с привлечением материалов по современным рискам и действиям в аварийных ситуациях (включая тренинги и практические упражнения) способно существенно снизить долю нарушений.

Производственный контроль и мониторинг состояния оборудования и условий труда. Организация должна обеспечить регулярные проверки состояния оборудования и условий труда. Контроль за выполнением этих мер должен вестись как на уровне операционного персонала (ведение журналов осмотров), так и со стороны службы охраны труда (инспекции, аудит). Тем самым обеспечивается еще одно звено «системности»: если один уровень контроля не сработал, другой своевременно выявит проблему.

Внедрение всех перечисленных мер в комплексе и их координация позволяют существенно повысить безопасность процесса сушки зерна на зерносушильном комплексе.

В работе зерносушильного комплекса параллельно должны выполняться несколько задач: техническая (исправность всей системы, поддержание технической работоспособности оборудования), производственная (реализация сушки зерна) и экономическая (сушка зерна с наименьшими материальными затратами).

Системный подход для обеспечения производственной безопасности на зерносушильном комплексе предусматривает комплексное управление мерами обеспечения безопасности: автоматический контроль технологических параметров процесса сушки, дистанционное управление технологическим оборудованием, реализация алгоритмов, обеспечивающих автоматическое поддержание техническими средствами режимов сушки, сигнализация и оповещение о нарушении технологических параметров, архивирование данных, что позволяет не только оперативно реагировать на отклонения в работе системы, но и формировать базу данных для последующего анализа. Сопутствующие процессы и их краткое описание приведены в табл. 2.

Таблица 2. Интегрированное управление процессом сушки на зерносушильном комплексе

Процесс	Описание процесса
Автоматический контроль	Позволяет отслеживать все технологические параметры и информировать оператора о 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

Обобщённо любую систему можно представить следующими компонентами: вход, управляющий модуль, управляемый модуль, выход, обратная связь [4]. Схема системы, предназначенной для обеспечения безопасной сушки зерна на зерносушильном комплексе, показана на рис. 1.



Рис. 1. Система обеспечения безопасности процесса сушки зерновых

Входными управляемыми параметрами в процессе безопасной сушки зерновых являются температура нагрева зерна в сушилке, влажность зерна на выходе из сушилки. Кроме того, важно контролировать наличие пыли и уровень отходов. 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. Кроме

того, в системе управления должны быть предусмотрены устройства для оперативного оповещения персонала об отклонении параметров от нормы (например, с помощью панели оператора) или аварийном состоянии параметров для оперативного реагирования персонала. В случае аварии эффективно предусматривать на комплексе автоматическую систему пожаротушения [5, с. 260].

Техническая реализация алгоритмов управления требует использования математической модели системы. Она также позволяет проанализировать качество управления. Таким образом можно представить сложный реальный процесс в упрощенной, но при этом достаточно точной форме с помощью математических понятий и отношений.

Математическая модель процесса сушки зерна на зерносушильном комплексе. Моделирование – это способ исследования динамических систем и их внутренних процессов. Это понятие неразрывно связано с информацией, отражающей воздействия, оказываемые на систему и ее составляющие, а также изменения, которые система переживает под влиянием этих воздействий. В математическом моделировании процесса сушки зерна используются системы уравнений, которые устанавливают связь между выходными и входными воздействиями. Эти уравнения позволяют исследовать влияние параметров оптимизации процесса сушки на независимые факторы, определяющие его ход. В описании данной математической модели в качестве оценочных показателей принята температура нагрева и конечная влажность зерна [6].

В тот момент, когда зерно находится в шахте зерносушилки, значение таких параметров как температура и влажность различная в разных частях объема, значит, имеет место распределение этих параметров по объекту, следовательно, объект можно интерпретировать как систему с распределёнными параметрами. Для упрощения вычислений такую систему целесообразно разделить на элементарные части или слои.

Итак, зерно, находящееся в шахте зерносушилки, заполняет собой необходимый объем, рядом с которым расположен нагреватель. 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 её 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 T_{cp} . Данную модель можно представить в виде графа:

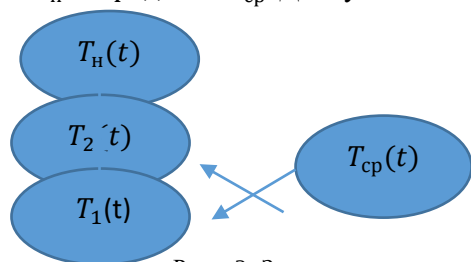


Рис. 2. Зависимость температуры нагрева зерна от времени

Из рис. 2 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 слоев.

Так как у разных слоев зерна разная температура, которая влияет на изменение температуры во всем объеме сырья, находящегося в зерносушильной шахте, то возникает необходимость скорректировать математическую модель с учетом коэффициента теплопроводности k , который играет роль усилителя или ослабителя температуры в процессе сушки. Изменение температуры с учетом k в первом слое будет иметь вид:

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

изменение температуры во втором слое будет иметь вид:

$$\frac{dT_2}{dt} = k_{n2}(T_n - T_2) + k_{12}(T_1 - T_2) + k_{cp2}(T_{cp} - T_2),$$

где T_n – температура нагревателя, T_{cp} – температура среды, T_1, T_2, T_n – температура слоя 1, слоя 2 и n -го слоя соответственно.

Температуры нагревателя и среды должны быть постоянно контролируемы оператором зерносушильного комплекса и постоянны.

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

Таким образом, вся система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dT_1}{dt} &= k_{21}(T_2 - T_1) + k_{cp1}(T_{cp} - T_1); \\ \frac{dT_2}{dt} &= k_{н2}(T_n - T_2) + k_{12}(T_1 - T_2) + k_{cp2}(T_{cp} - T_2); \\ \frac{dT_n}{dt} &= 0; \\ \frac{dT_{cp}}{dt} &= 0.\end{aligned}$$

Итак, получена система обыкновенных дифференциальных уравнений в каноническом виде от одной независимой переменной времени (t). Из законов физики следует, что количество тепла, которое поступает от слоя 1 к слою 2, равно количеству тепла, которое принимает слой 2 из слоя 1. Это означает, что $k_{12} = k_{21}$.

Таким образом, изменение температуры всего объема зерна, находящегося в зерносушильном комплексе, можно описать системой дифференциальных уравнений изменения температуры отдельных слоёв зерна. Для решения системы дифференциальных уравнений необходимо знать коэффициенты теплопроводности и начальное состояние системы, т. е. температуру каждого выделенного слоя, а также температуру нагревателя и среды в начальный момент времени.

Неоднородное распределение влаги по слоям зерновой массы влечёт за собой колебания влажности по всей массе обрабатываемого сырья, располагающегося непосредственно в зерносушильной шахте. Поскольку подавляющее большинство поступающего на сушку зерна имеет влажность ниже гигроскопической, допустимую скорость сушки каждого слоя можно выразить в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{dW}{dt} = \mu(W - W_p),$$

где μ – коэффициент влагопроводности; W – текущая влажность; W_p – равновесная влажность.

Изменение влажности всего объема зерна, находящегося в зерносушильном комплексе, можно описать системой дифференциальных уравнений изменения влажности отдельных слоёв зерна, решение которой не представляет математической сложности.

Таким образом, зная, какие показатели необходимо иметь на выходе, а это зависит от того, для чего предназначено сырьё: продовольствие, фураж или семенной материал, и, зная 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 такие параметры как температура и влажность 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.

Математическое моделирование процесса сушки зерна помогает установить оптимальные условия для сушки (температура, влажность, скорость воздушного потока), предсказывать изменения влажности и массы зерна с течением времени, вычислять потери, определять энергетическую эффективность сушилки и оценивать качество процесса сушки. Это важно для предотвращения пересыхания или недостаточной сушки, что влияет на хранение и последующую переработку зерна.

Заключение

На основании системного подхода анализа условий безопасного обеспечения процесса сушки зерновых на зерносушильном комплексе выявлены следующие необходимые обязательные меры: исправная работа оборудования (норий, машин, топочного агрегата и др.); контроль технологических параметров; оперативная передача информации для реагирования персоналу; обеспечение технологической и аварийной сигнализации; обучение действиям персонала в случае аварийной сигнализации; применение автоматической системы пожаротушения.

Техническая реализация безопасного процесса сушки зерновых требует алгоритмов управления на базе математической модели системы. Описана математическая модель процесса сушки зерна в зерносушилке, которая способна обеспечивает оптимизацию процесса сушки, что позволяет снизить риски аварийной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаршунов, В. А. Сушка и хранение зерна: справ. пособие / В. А. Шаршунов, Л. В. Рукшан. – Минск: Мисанта, 2010. – 587 с.
2. Шило, И. Н. Современное оборудование и машины для послеуборочной обработки зерна: справочник / И. Н. Шило, Е. И. Михайловский. – Минск: БГАТУ, 2011. – 508 с.
3. Белов, П. Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование. Ч.1 / П. Г. Белов. – М.: Юрайт, 2022. – 211 с.
4. Пилиневич, Л. П. Системный подход в исследовании производственной безопасности. Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций / Л. П. Пилиневич, А. Г. Бунас, Н. В. Русина // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2025. – № 1 (57).
5. Комплексы зерноочистительно-сушильные ЗСК-Ш, ЗСК-ША: руководство по эксплуатации. – ОАО «АМКОДОР-СЕМАШ» – управляющая компания холдинга», 2020. – 270 с.
6. Пилиневич, Л. П. Системный подход в исследовании практического маркетинга / Л. П. Пилиневич, К. В. Шенец // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.- практ. конф., Минск, 20–21 мая 2020 г.: в 3 ч. / редкол.: В. А. Богущ [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2020. – Ч. 3. – С. 221–226.
7. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, Г. В. Карпенко [и др.]. – Ульяновск: УГТХА им. П. А. Столыпина, 2013. – 290 с.